



**ANALYSE COMPAREE
DU BILAN ENVIRONNEMENTAL
D'UN CYCLE ELECTRONUCLEAIRE
« MONORECYCLAGE PU »
ET D'UN CYCLE OUVERT**

PNGMDR 2016-2018 article 9

Décembre 2018

Résumé/Conclusions

En réponse à l'article 9 du PNGMDR 2016-2018, une analyse comparée des impacts pour l'environnement du cycle actuel (monorecyclage du seul Pu) et d'un cycle ouvert a été réalisée. Cette étude a permis de décrire de façon très complète les deux scénarios demandés, en prenant en compte les usines du cycle et installations d'entreposage intermédiaire et de stockage, ainsi que les flux de matières et de déchets.

Le cycle actuel permet une économie de 10% d'uranium naturel (soit 975 tonnes d'uranium par an), et entraîne mécaniquement une réduction de 10% des impacts directement liés à la mine, tel que le volume des déchets miniers. Les écarts entre les deux scénarios pour les différentes catégories d'impact environnemental retenues sont généralement faibles (75 % des indicateurs présentent moins de 20 % de différence en relatif).

Le bilan comparé d'un cycle ouvert fait apparaître, par rapport au cycle actuel :

- Un indicateur ACV « radioélément » plus faible (-28%). Cet indicateur dépend notamment des rejets en C14 d'une part, de la modélisation des émissions de radon des résidus miniers d'autre part
- Un indicateur « volume des déchets MA-VL » plus faible (-66%). Les usines de l'aval du cycle, principaux contributeurs dans le cas du cycle actuel, n'existent pas dans un cycle ouvert
- Un indicateur « volume des déchets HA » beaucoup plus élevé (+283%), conduisant à une dégradation également du volume global pour les déchets MA-VL + HA destinés à Cigéo (+24%). Dans le cas d'un cycle ouvert, tous les combustibles usés sont considérés comme des déchets. Est illustré ici l'apport du traitement recyclage sur le volume des déchets destinés à CIGEO.

D'autres catégories d'impact mériteraient d'être considérées, telles que notamment les emprises ou l'impact au stockage. La démarche ACV doit également être complétée par une étude de sensibilité afin d'évaluer les incertitudes liées aux données, évaluations et hypothèses utilisées. Ces éléments constituent des axes d'amélioration de la présente étude.

Sommaire

1	INTRODUCTION.....	8
1.1	Objet du document	8
1.2	Glossaire.....	8
2	OBJECTIFS ET PÉRIMÈTRE DE L'ÉTUDE RÉALISÉE	9
3	HYPOTHESES.....	10
3.1	Flux de matière de l'amont	10
3.1.1	Cycle actuel.....	11
3.1.2	Cycle ouvert.....	12
3.1.3	Comparaison des besoins en uranium naturel entre les deux scénarios.....	13
3.2	Flux de matière de l'aval.....	13
3.3	Usines considérées	14
3.3.1	Mines.....	14
3.3.2	Autres usines du cycle.....	15
3.3.3	Energie produite par les réacteurs.....	16
3.3.4	Durée de vie des usines	17
3.4	Matériaux et énergies de construction.....	17
3.4.1	Energies de construction	17
3.4.2	Matériaux de construction	18
3.5	Inventaire des usines en phase d'exploitation.....	20
3.6	Emanation de radon	20
3.6.1	Cas des mines.....	20
3.6.2	Cas de Malvési	22
3.7	Rejets chimiques des mines.....	22
3.7.1	Rejets liquides	22
3.7.2	Rejets de poussières atmosphériques.....	24
3.8	Transports.....	26
3.8.1	Transport des matières nucléaires et déchets.....	26
3.8.2	Transport des matériaux de construction, déchets de démantèlement et réactifs.....	27
3.9	Flux de déchets HA et MA-VL	27
3.10	Entreposages.....	29
3.10.1	Données de base	29
3.10.2	Cas de l'uranium appauvri et de retraitement.....	30
3.10.3	Modélisation de l'entreposage des combustibles usés.....	31
3.11	Stockage des déchets	32

3.12	Déchets et énergies liés à la déconstruction	32
4	METHODE DE CALCUL DES INDICATEURS D'IMPACT POTENTIEL ACV.....	35
4.1	Choix des indicateurs	35
4.2	Cas des réactifs	36
4.2.1	Méthodologie	36
4.2.2	Choix des substituts	37
4.2.3	Concentration des réactifs	38
4.2.4	Impacts évités.....	39
4.3	Impact des rejets radioactifs	39
4.4	Indicateurs de rejets chimiques	40
4.5	Description du logiciel.....	41
5	RESULTATS DES CALCULS D'INDICATEUR D'IMPACT ACV ET INTERPRETATION.....	42
5.1	Transports.....	42
5.2	Surfaces des entreposages	43
5.3	Résultats pour les deux scénarios.....	44
5.3.1	Cycle actuel.....	44
5.3.2	Cycle ouvert.....	47
5.3.3	Contribution des différentes phases du cycle de vie des usines	49
5.3.4	Effet de serre du cycle électronucléaire.....	52
5.3.5	Comparaison des deux scénarios	53
5.3.6	Analyse de l'origine des impacts potentiels	55
6	CONCLUSION	58
6.1	Bilan	58
6.2	Perspectives	60
7	Références bibliographiques	61
8	ANNEXES	63
8.1	Annexe 1 : Inventaire de fonctionnement des usines.....	63
8.2	Annexe 2 : Emission de radon à partir des bassins B1 et B2 de Malvési	84
8.3	Annexe 3 : Inventaire ANDRA des déchets FA-VL lors du démantèlement des installations	88
8.4	Annexe 4 : Fiches Ecoinvent 3.1 des réactifs	89
8.5	Annexe 5 : Spectres radiologiques des usines	93
8.6	Annexe 6 : Estimation des données de construction et de fonctionnement d'une piscine d'entreposage des combustibles usés	111
8.7	Annexe 7 : Résultats des calculs d'impact	113
8.8	Annexe 8 : Paramètres pour l'étude de sensibilité	121

Liste des figures

Figure 1 : Impacts du cycle actuel sans rejets liquides des mines	45
Figure 2 : Impacts du cycle actuel avec rejets liquides potentiels des mines	45
Figure 3 : Autres catégories d'impacts du cycle actuel.....	46
Figure 4 : Impacts du cycle ouvert sans rejets liquides des mines.....	47
Figure 5 : Impacts du cycle ouvert avec rejets liquides potentiels des mines.....	48
Figure 6 : Autres impacts du cycle ouvert	49
Figure 7 : Impact "aquatic ecotoxicity" pour le cycle actuel.....	50
Figure 8 : Impact "carcinogens" pour le cycle actuel.....	50
Figure 9 : Impact "global warming" pour le cycle actuel.....	51
Figure 10 : Impact "ionizing radiation" pour le cycle actuel	51
Figure 11 : Ecart relatif des catégories IMPACT2002+ entre le cycle actuel et un cycle ouvert, sans rejets potentiels des résidus miniers	54
Figure 12 : Ecart relatif des catégories IMPACT2002+ entre le cycle actuel et un cycle ouvert, avec rejets potentiels des résidus miniers.....	54
Figure 13 : Ecart relatif des volumes de déchets entre le cycle actuel et un cycle ouvert	55
Figure 14 : Valeurs de l'impact « aquatic ecotoxicity » par usine pour le cycle actuel.....	56
Figure 15 : Valeurs de l'impact « carcinogens » par usine pour le cycle actuel.....	56
Figure 16 : Valeurs de l'impact « ionizing radiation » par usine pour le cycle actuel	57
Figure 17 : Valeurs de l'impact « global warming » par usine pour le cycle actuel.....	57
Figure 18 : Ecart relatif entre le cycle actuel et un cycle ouvert	59

Liste des tableaux

Tableau 1 : Gestion actuelle des combustibles sur le parc français.....	11
Tableau 2 : Masse d'U enrichi nécessaire pour l'ensemble du parc EDF dans une configuration de recyclage du plutonium.....	12
Tableau 3 : Masse d'U enrichi nécessaire pour l'ensemble du parc EDF en cycle ouvert	12
Tableau 4 : Influence du taux d'appauvrissement sur les masses d'uranium nécessaires par an du parc français (cycle avec recyclage et cycle ouvert)	13
Tableau 5 : Origine de l'uranium livré aux installations de l'Union européenne en 2015	14
Tableau 6 : Approvisionnement d'EDF dans les différents types de mines d'uranium (cycle actuel) et mines Orano correspondantes.....	15
Tableau 7 : Usines et ateliers nécessaires au cycle électronucléaire français	16
Tableau 8 : Production nette des différentes tranches de réacteurs nucléaires français	17
Tableau 9 : Besoins en matériaux et énergie pour la construction des usines du cycle.....	19
Tableau 10 : Emissions de radon à partir des flux au-dessus des résidus pour les usines du Niger	21
Tableau 11 : Emissions de Rn222 pour les trois mines & usines « modèles » selon la méthode empirique	21
Tableau 12 : Emissions à long terme de Rn222 pour les trois mines et usines « modèles »	22
Tableau 13 : Rejets liquides potentiels par les résidus de traitement des mines.....	24
Tableau 14 : Masse de poussières et polluants émis par les mines & usines d'uranium nigériennes (t/an)	25
Tableau 15 : Facteurs de caractérisation de différents polluants sous forme de poussières.....	25
Tableau 16 : Coefficients de rejets de polluants pour les différents modes de transport	26
Tableau 17 : Volume des déchets HA pour le cycle actuel.....	28
Tableau 18 : Volume des déchets MA-VL au traitement pour le cycle actuel – 1118tMLi (2016).....	28
Tableau 19 : Volume des déchets HA pour le cycle ouvert	29
Tableau 20 : Données de base pour les entreposages (1/2).....	29
Tableau 21 : Données de base pour les entreposages (2/2).....	30
Tableau 22 : Volumes FA-VL entreposés pour l'U appauvri et l'URT	31
Tableau 23 : Volumes annuels à stocker pour l'U appauvri et l'URT dans le cycle actuel (année 2016)	31
Tableau 24 : Données de base pour les déchets destinés à Cigéo	32
Tableau 25 : Production de déchets conditionnés de démantèlement des usines du cycle	33

Tableau 26 : Catégories d'impact retenues pour l'étude	35
Tableau 27 : Comparaison des impacts sur l'acidification aquatique de la fabrication de l'acier, selon la stratégie	37
Tableau 28 : Liste des substituts utilisés pour l'étude d'impact	37
Tableau 29 : Estimation de l'impact de la fabrication du zircaloy	38
Tableau 30 : Concentrations ajustées pour l'impact de quelques réactifs	39
Tableau 31 : Estimation des poussières rejetées par l'usine Katco	40
Tableau 32 : Intitulés analytiques et leurs équivalents pour cette étude	40
Tableau 33 : Rejets dus aux transports pour le cycle actuel (t/an)	42
Tableau 34 : Rejets dus aux transports pour le cycle ouvert (t/an)	43
Tableau 35 : Comparaison des rejets liés aux transports des deux scénarios	43
Tableau 36 : Surfaces d'entrepôts pour les deux scénarios (m²/an)	44
Tableau 37 : Contribution du cycle électronucléaire à l'effet de serre	52
Tableau 38 : Différentes valeurs d'effet de serre de l'énergie nucléaire (gCO₂/kWh)	53
Tableau 39 : Evolution de 4 autres indicateurs entre le cycle actuel et un cycle ouvert	55

1 INTRODUCTION

1.1 Objet du document

Le Ministère de l'Environnement, de l'Energie, de la Mer a fait paraître au Journal officiel du 25/02/2017 l'arrêté du 23/02/2017 dit « PNGMDR » qui comprend 72 articles [Ministère de l'Environnement 2017], dont l'article 9 :

« Areva, en lien avec le CEA, EDF et l'ANDRA, réalise une analyse comparée des impacts pour l'environnement d'une stratégie de retraitement des combustibles usés en comparaison de celle qui résulterait de l'absence de retraitement, en considérant l'ensemble du cycle de vie du combustible, depuis l'extraction de l'uranium jusqu'au stockage des déchets induits... L'ASN est saisie pour avis sur cette étude. »

Ce document présente les données, les hypothèses et les résultats de cette étude, menée en collaboration par le CEA, EDF, et Orano.

1.2 Glossaire

Terme/sigle	Définition
ACV	Analyse de cycle de vie
DD	Déchets dangereux (anciennement industriels spéciaux)
DND	Déchets non dangereux (anciennement industriels banals)
Extrant	Flux de produit, de matière ou d'énergie sortant dans un processus élémentaire (ISO 14040)
FC	Facteur de caractérisation : établi à partir d'un modèle qui est utilisé pour convertir les résultats de l'inventaire du cycle de vie en unité commune d'indicateur de catégorie (ISO 14040)
Intrant	Flux de produit, de matière ou d'énergie entrant dans un processus élémentaire (ISO 14040)
ISL	« In-situ leaching » : lixiviation in-situ
Monel	Groupe d'alliages à base de nickel principalement et de cuivre, résistant à la corrosion (en particulier par l'UF ₆)
MCO	Mine à ciel ouvert
MS	Mine souterraine
NELCAS	"Nuclear Energy Life Cycle Assessment Simulation tool", logiciel d'ACV développé au CEA Marcoule
RTE	Réseau de Transport d'Électricité, entreprise de service qui gère le réseau public de transport d'électricité haute tension en France métropolitaine
tML ou tMLi	« Tonne de métal lourd » (métal lourd : U + Pu) ou « Tonne de métal lourd initial » (initial : avant irradiation), unités employées dans le cycle du combustible
Unité fonctionnelle	Performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence, dans une analyse de cycle de vie
UTS	Unité de travail de séparation (enrichissement)
URT	Uranium de retraitement

2 OBJECTIFS ET PÉRIMÈTRE DE L'ÉTUDE RÉALISÉE

Afin de répondre à l'article 9 de l'arrêté du 23/02/2017, il a été convenu entre les différents acteurs concernés par cette étude (AREVA, EDF et le CEA) d'apporter une réponse scientifique sous la forme d'une Analyse du Cycle de Vie (ACV).

Cette stratégie de réponse a fait l'objet d'échanges dans le cadre d'un groupe de travail du PNGMDR dédié, piloté par la Direction Générale de l'Energie et du Climat. Elle permet de réaliser une étude comparative aussi complète que possible, « *du berceau à la tombe* » selon l'expression consacrée, en tenant compte d'un référentiel méthodologique reconnu internationalement.

L'objectif de cette ACV est de comparer les bilans environnementaux des deux scénarios de cycle nucléaire :

- un cycle partiellement fermé, avec traitement du combustible utilisé UOX et mono-recyclage du plutonium en combustible MOX mais sans recyclage de l'URT* comparable à celui pratiqué aujourd'hui en France (« cycle actuel »),
- un cycle dit ouvert, sans retraitement du combustible utilisé.

Cette étude ACV repose sur les données d'inventaires communiqués par les différents exploitants concernés, avec les méthodes de calcul les mieux adaptées.

L'unité fonctionnelle sera la production d'1 MWh d'électricité nucléaire nette produite et injectée dans le réseau, en prenant en compte toutes les installations nécessaires du cycle français

Les frontières précises du système sont définies de façon détaillée dans le chapitre suivant.

Il est important de rappeler que l'ACV consiste à déterminer un bilan environnemental global, exprimé en indicateurs d'impact potentiels ACV, et n'a donc pas pour ambition de refléter les impacts réels des sites étudiés, qui seraient par exemple exprimés en Sv pour des impacts radiologiques. Ces impacts réels locaux sont eux accessibles par des évaluations spécifiques sur les sites concernés tenant compte des paramètres locaux et des résultats de la surveillance de l'environnement local. Ceci fait l'objet d'autres types d'études, réalisées par les exploitants (ex : études d'impact).

3 HYPOTHESES

Le grand nombre d'installations concernées par le cycle électronucléaire, la diversité des types de données nécessaires (intrants*, extrants*) et le manque de certaines données nécessitent de formuler des hypothèses et des choix, qu'il convient de présenter et de tracer. Ces choix sont détaillés dans les paragraphes suivants.

Il convient de rappeler que cette situation n'est pas spécifique à cette étude, et qu'elle se retrouve inévitablement dans les études de type ACV.

Pour mémoire, de nombreuses études ont déjà été menées pour comparer l'énergie nucléaire aux autres sources d'énergie en déterminant leurs différentes catégories d'impact, et au sein de l'énergie nucléaire pour estimer les écarts entre les cycles fermé et ouvert. Le Tableau 38 récapitule et compare les résultats de ces études en ce qui concerne la contribution à l'effet de serre. Le CEA Marcoule a travaillé pendant plusieurs années sur l'ACV du cycle actuel et estimé les impacts de différents cycles du futur, sur la base de données publiques d'inventaire datant pour la plupart des années 2008-2010, voire plus anciennes pour certaines.

L'étude objet de ce document s'appuie dans toute la mesure du possible sur des données récentes fournies ou validées par les exploitants, mais peut également utiliser le cas échéant des données plus anciennes qui seront référencées.

3.1 Flux de matière de l'amont

Le détail de la gestion des cœurs de réacteurs par EDF a été pris en compte dans cette étude car la fréquence de renouvellement partiel des cœurs, liée au taux de combustion, et la composition isotopique des différents types de combustibles, ont un impact sur la quantité d'uranium naturel nécessaire pour les scénarios retenus.

Les données de référence ont été communiquées par EDF [Pays 2016] et sont présentées dans le Tableau 1. Les longueurs naturelles de campagne, exprimées en « Jour Equivalent Pleine Puissance » (JEPP) sont déterminées par les calculs de physique des réacteurs. Elles peuvent différer des longueurs moyennes effectives en fonction des choix de pilotage de RTE et d'EDF. Dans cette étude, nous ferons l'hypothèse que les longueurs moyennes effectives sont égales aux longueurs naturelles.

3.1.1 Cycle actuel

Tableau 1 : Gestion actuelle des combustibles sur le parc français

P (MWe)	Palier	Nom	Type	Nb AC neufs	Lnat (JEPP)	BU décharge moyen (MWj/t)
900	CP0	CYCLADES	UO2 1/3 4.2 %	52 (24 + 28 Gd)	380	48
	CPY	GARANÇE	UO2 1/4 3.7 %	40	280	46
		Parité MOX	UO2 1/4 3.7 % + MOX 1/4 8.65 %	40 (28 + 12 MOX)	280	46
1300	P4/P'4	GEMMES	UO2 1/3 4 %	64 (40 + 24 Gd)	395	48
1450		N4	ALCADE	UO2 1/3 4 %	68 (28 + 40 Gd)	380

Il est alors possible de calculer la masse d'uranium enrichi nécessaire par type de réacteur selon la formule :

$$\text{Masse U annuelle nécessaire par réacteur} = (\text{masse U dans le cœur} * \text{fractionnement}) * (365,25 / \text{Lnat}) * Kp$$

avec :

- Fractionnement : fraction du cœur (1/3 ou 1/4) remplacée à l'issue d'un cycle d'irradiation
- Lnat = longueur de campagne, cf. ci-dessus
- Kp : facteur de charge, qui illustre le fonctionnement réel d'un réacteur (c'est le rapport de l'énergie effectivement fournie, durant un intervalle de temps déterminé, au produit de la puissance nominale en régime continu, par cet intervalle de temps).

Les facteurs de charge des différents réacteurs d'un parc national sont variables d'une année à l'autre. Dans cette étude, nous retenons la valeur de l'année 2015, qui est une année de fonctionnement représentative du parc nucléaire français, avec un Kp moyen pour les 58 réacteurs de 75,8 %. La production nette d'électricité de l'année 2015 était de 419 TWh [Elecnucl 2016].

La production est appliquée au cycle ouvert comme au cycle fermé. Ce choix d'une année de référence n'est donc pas susceptible de modifier significativement la comparaison relative des deux cycles considérés.

On aboutit aux masses annuelles d'uranium enrichi suivantes :

Tableau 2 : Masse d'U enrichi nécessaire pour l'ensemble du parc EDF dans une configuration de recyclage du plutonium

Type de réacteur/mode de gestion	Nombre de réacteurs	Nombre d'assemblages par cœur	Masse Uenr dans un cœur (t)	Masse annuelle Uenr nécessaire par réacteur en 2015 (t/an)	Taux de charge Kp 2015 (%)	Masse annuelle Uenr nécessaire pour le parc EDF (t/an)
900 MW UOX Cyclades	6	157	71,524	17,302	75,5	103,8
900 MW UOX Garance	4		73,539	18,107	75,5	72,4
900 MW moxés	24		51,480	12,675	75,5	304,2
1300 MW UOX	20	193	102,775	23,885	75,4	477,7
1450 MW UOX	4	205	109,394	27,654	78,9	110,6
					Total	1068,8

3.1.2 Cycle ouvert

Dans cette configuration hypothétique, la gestion actuelle des 24 réacteurs moxés est remplacée par leur équivalent géré en mode Garance (avec un enrichissement à 3,7 % d'U235), ce qui conduit aux masses annuelles d'uranium enrichi suivantes.

Tableau 3 : Masse d'U enrichi nécessaire pour l'ensemble du parc EDF en cycle ouvert

Type de réacteur/mode de gestion	Nombre de réacteurs	Nombre d'assemblages par cœur	Masse U dans un cœur (t)	Masse annuelle Uenr nécessaire par réacteur en 2015 (t/an)	Taux de charge Kp 2015 (%)	Masse annuelle Uenr nécessaire pour le parc EDF (t/an)
900 MW UOX Cyclades	6	157	71,524	17,302	75,5	103,8
900 MW UOX Garance	28		73,539	18,107	75,5	507,0
1300 MW UOX	20	193	102,775	23,885	75,4	477,7
1450 MW UOX	4	205	109,394	27,654	78,9	110,6
					Total	1199,1

3.1.3 Comparaison des besoins en uranium naturel entre les deux scénarios

Pour obtenir la masse d'uranium naturel nécessaire, il faut effectuer un bilan matière sur l'U et l'U235, à partir de l'isotopie de l'U enrichi des différents types de gestion des combustibles et de l'isotopie de l'U appauvri retenue en sortie du processus d'enrichissement.

Une analyse de sensibilité a été effectuée sur les inventaires de matière en fonction de la teneur en U235 de l'uranium appauvri en sortie de l'usine d'enrichissement.

Tableau 4 : Influence du taux d'appauvrissement sur les masses d'uranium nécessaires par an du parc français (cycle avec recyclage et cycle ouvert)

Taux d'appauvrissement U235 (%)	Cycle actuel (t Unat/an)	Cycle ouvert (t Unat/an)	Economie d'U pour le cycle actuel (t Unat)
0,2	7767	8660	893
0,25	8494	9469	975
0,3	9397	10475	1078

Les calculs montrent que l'économie relative de matière de la gestion actuelle (recyclage de la totalité du plutonium Pu mais pas de recyclage de l'URT) par rapport à un cycle ouvert est de 10,3% quel que soit le taux d'appauvrissement retenu.

Une réduction du taux d'appauvrissement de 0,30 % à 0,20 % diminue le besoin d'uranium naturel de 20 %, quel que soit le cycle considéré. Les effets du recyclage et taux d'appauvrissement sur la consommation d'uranium naturel sont cumulatifs.

Le choix du taux d'appauvrissement (résultat dans la pratique industrielle d'une optimisation économique entre la consommation d'uranium naturel et la consommation d'UTS) ne modifie donc pas la comparaison relative des flux sur ces cycles.

Dans cette étude, on prendra la valeur moyenne de 0,25 % d'U235 pour l'uranium appauvri. Cette valeur correspond à la teneur moyenne en U235 du stock détenu actuellement par Orano. La masse d'uranium naturel consommée annuelle correspondante est ainsi de 8494 t pour le cycle actuel et de 9469 t pour le cycle ouvert.

3.2 Flux de matière de l'aval

La composition isotopique d'un combustible UOX irradié à 45 GWj/t et refroidi 10 ans : est de 94,1 % d'U, 1,1 % de Pu et 4,8 % de produits de fission.

Avec la gestion du cycle actuel, les 1069 tonnes d'U enrichi contenues dans les combustibles UOX produisent 1006 t/an d'URT et 11,76 t/an de Pu. Avec les hypothèses de l'étude, il faut 11,28 t/an de Pu pour alimenter les 24 réacteurs moxés. Le cycle tel que modélisé dans cet étude est donc ainsi quasiment à l'équilibre pour le Pu en retraitant la totalité des combustibles UOX. Dans le cycle réel, les taux d'irradiations des combustibles UOX sont variables et les teneurs en Pu des MOX sont ajustées à la marge pour assurer l'équilibre exact entre les quantités de plutonium récupérées à La Hague et celles recyclées dans les combustibles MOX.

En cycle « ouvert », 1199 t/an de combustible UOX sont produits, qui deviendraient alors un déchet de haute Activité (HA) destiné à un stockage définitif dans l'installation Cigéo.

3.3 Usines considérées

3.3.1 Mines

L'activité « mines » est généralement connue comme l'activité présentant quelques-unes des émissions les plus contributrices aux indicateurs d'impact ACV. Sachant qu'il existe différents types d'extractions minières (à ciel ouvert, souterraine, lixiviation in situ), il est donc important de déterminer quels types de mines sont à considérer dans le présent exercice.

Afin de refléter au mieux la réalité de l'approvisionnement minier français, EDF a précisé que l'origine géographique de ses approvisionnements d'uranium est similaire aux données figurant dans le rapport annuel [EURATOM 2016] pour les exploitants nucléaires européens.

Tableau 5 : Origine de l'uranium livré aux installations de l'Union européenne en 2015

Mining origin	Quantity (tU)	Share (%)
Niger	3 152	22.0
Canada	2 946	20.6
Russia	2 765	19.3
Kazakhstan	2 261	15.8
Australia	1 896	13.2
Namibia	504	3.5
EU	220	1.5
Re-enriched tails	212	1.5
Other	130	0.9
United States	125	0.9
Uzbekistan	115	0.8
Total	14 325	100.0

Connaissant les principaux types d'extraction minières (souterraine, ciel ouvert, ou « in situ leaching ») opérées actuellement en fonction des pays, il est alors possible de déterminer la part des différents type de mines dans l'approvisionnement EDF.

Les données environnementales nécessaires dans le cadre de cette étude ACV n'étant pas disponibles pour toutes les mines non-opérées par Orano, il a été décidé de représenter ces 3 types d'exploitation par des mines de même type exploitées par Orano. Une mine représentative de chacun des 3 types d'exploitations minières a été choisie (2 au Niger et 1 au Kazakhstan). Le bilan environnemental est alors calculé à partir des bilans environnementaux de ces mines représentatives, au prorata des productions d'uranium considérées.

Tableau 6 : Approvisionnement d'EDF dans les différents types de mines d'uranium (cycle actuel) et mines Orano correspondantes

Type de mine	Répartition approvisionnement EDF (%)	Quantité U pour le parc (t)		Mines modèles Orano	Production 2015 des 3 mines modèles (tU)
		Cycle avec recyclage	Cycle ouvert		
Souterraine (MS)	54	4587	5113	Cominak	1607
Ciel ouvert (MCO)	18	1529	1704	Somaïr	2509
In situ leaching (ISL)	28	2378	2651	Katco	4007

L'hypothèse de travail retenue est donc de représenter l'ensemble des données minières nécessaires pour l'ACV en se référant aux données détaillées disponibles sur ces trois types de mines Orano, de même type d'exploitation, en respectant le poids relatif de ces types de mines dans l'approvisionnement d'EDF.

Toutefois, il est à noter que, en considérant que tout l'uranium nécessaire aux besoins des 58 réacteurs français provient du Niger et du Kazakhstan, l'impact des transports associés est probablement minimisé par rapport à des approvisionnements plus lointains, venant du Canada ou d'Australie.

Ce point pourra être abordé lors de l'étude de sensibilité, pour évaluer l'impact d'une variation de cette hypothèse sur les résultats finaux.

3.3.2 Autres usines du cycle

Pour les autres usines de l'amont du cycle, il existe plusieurs fournisseurs internationaux pour lesquelles toutes les données nécessaires à une analyse Cycle de vie ne sont pas disponibles dans le cadre de cette étude.

De façon similaire à ce qui a été fait pour les mines, les différentes usines alimentant la flotte EDF sont donc représentées par les usines d'Orano et de Framatome, avec leurs données et bilans environnementaux. Le bilan environnemental des étapes de transformations de l'amont est ainsi réalisé à partir des données des 3 usines suivantes d'Orano et de Framatome :

- Conversion (1^{ère} étape) à Malvés (Aude),
- Conversion (2^{ème} étape) et Enrichissement à Pierrelatte (site du Tricastin),
- Fabrication des combustibles à Romans.

Cette question d'accès aux données nécessaires à l'ACV ne se pose pas pour les usines de l'aval du cycle pour lequel les usines Orano de La Hague et MELOX sont seuls fournisseurs de traitement-recyclage pour EDF.

D'autres installations industrielles, jugées indispensables au cycle de l'uranium, sont également prises en compte dans l'ACV pour représenter fidèlement l'ensemble des installations du cycle (défluoration de l'UF₆ appauvri à l'usine W, gestion des effluents des usines de Pierrelatte sur Socatri, fabrication de l'UO₂ appauvri pour alimenter l'usine MOX, ...). Les différentes mines et usines du cycle sont présentées dans le Tableau 7 ci-après.

Tableau 7 : Usines et ateliers nécessaires au cycle électronucléaire français

Etape	Usine	Fonction
Mines	Somaïr (Niger)	Mine à ciel ouvert (MCO)
	Cominak (Niger)	Mine souterraine (MS)
	Katco (Kazakhstan)	Mine ISL
Conversion	Comurhex 2 Malvési	Conversion yellow cake → UF ₄
	Comurhex 2 Pierrelatte	Conversion UF ₄ → UF ₆
Enrichissement	GB2 (unités Nord et Sud)	Enrichissement de l'UF ₆ par ultra-centrifugation
	REC2	Atelier d'ajustement isotopique
	Socatri	Traitement de surface et d'effluents (rejet des effluents de GB2), maintenance de conteneurs
	Usine W	Défluoration de l'UF ₆ appauvri
Fabrication UOX	Romans	Fabrication de combustibles UOX
Retraitement	La Hague (usines UP2-800 et UP3)	Retraitement du combustible utilisé
	TU5 Pierrelatte	Dénitration de l'URT
Fabrication MOX	Mélox	Fabrication du combustible MOX
	Lingen (Allemagne)	Fourniture d'UO ₂ appauvri
Réacteurs	58 répartis sur 19 sites	Production d'électricité nucléaire
Stockage	CIRES Morvilliers	Stockage des déchets TFA
	CSA Soulaines	Stockage des déchets FMA-VC
	Futur Cigéo (Bure)	Stockage profond des déchets HA et MA-VL

Les installations d'entreposage des combustibles usés, de l'uranium appauvri et de retraitement, et des déchets en attente d'évacuation sont également prises en compte et présentées de façon détaillée au § 5.2.

3.3.3 Energie produite par les réacteurs

La puissance du parc est de 63,13 GWe en valeur nette [ElecNuc 2016].

En sus, une consommation de 5000 MWh de gasoil par réacteur et par an a été considérée, sachant que chaque réacteur possède deux groupes électrogènes qui sont testés chaque mois pendant environ 1 heure. La production pour chaque type de tranche est présentée dans le tableau suivant, ces valeurs étant celles qui sont prises en compte dans l'application NELCAS.

Tableau 8 : Production nette des différentes tranches de réacteurs nucléaires français

Type de tranche (MW)	900	1300	1450
Production nette annuelle maximale d'un réacteur (TWh/an)	7,93	11,6	13,1
Kp 2015	0,755	0,754	0,789
Production nette effective d'un réacteur en 2015 (TWh)	5,99	8,71	10,4

3.3.4 Durée de vie des usines

Une étude ACV étant globale (de la phase de construction d'une installation jusqu'au démantèlement et à l'élimination des déchets), elle nécessite de considérer que l'ensemble des impacts de l'installation, y compris l'approvisionnement en matériaux de construction et l'énergie dépensée pour construire les installations, est réparti sur la durée de vie de l'usine, c'est-à-dire sur sa période de fonctionnement. Concernant la durée de vie des réacteurs, la réglementation française ne fixe pas de durée de vie maximale. EDF doit faire valider tous les 10 ans une autorisation d'exploitation délivrée par l'ASN après une visite approfondie des installations. EDF envisage de les faire fonctionner jusqu'à 60 ans. Dans le cadre de cette étude, nous avons considéré une durée de vie moyenne des réacteurs du parc français de **50 ans**, intermédiaire entre une valeur basse de 40 ans et une valeur haute de 60 ans.

Par ailleurs, toutes les usines Orano du cycle font l'objet d'investissements industriels réguliers pour maintenir leurs capacités et répondre à la demande des clients électriciens. Aussi il est retenu pour ces usines une durée de fonctionnement au moins équivalente, aussi bien pour la fabrication de combustibles neufs que pour le retraitement de combustibles usés.

Pour les durées d'entreposage, les différentes hypothèses retenues sont les suivantes :

- Pour l'U appauvri et l'URT une durée arbitraire de 15 ans d'entreposage a été prise en compte ;
- Pour l'entreposage des combustibles UOX usés et des colis CSD-V, et CSD-C la durée retenue est de 60 ans ;
- Pour l'entreposage des combustibles MOX usés, la durée d'entreposage est de 90 ans.

Pour les 3 stockages de l'Andra (Cires, CSA et Cigéo), une durée de 100 ans a été retenue, cohérente pour Cigéo avec la période de réversibilité du stockage profond. Il est fort probable que le Cires et le CSA seront saturés avant cette durée, mais une période de surveillance suivra (300 ans pour le CSA).

Au final, la durée de vie des usines est un paramètre qui pourra évoluer ultérieurement lors de l'étude de sensibilité.

3.4 Matériaux et énergies de construction

3.4.1 Energies de construction

Vu la taille des installations industrielles, il a également été jugé nécessaire de ne pas négliger les énergies nécessaires à la construction des usines de l'ensemble du cycle.

Cependant, en l'absence de données industrielles pour l'ensemble des installations du cycle, il a été procédé à des estimations d'ordres de grandeur, sur la base de la taille des infrastructures respectives des bâtiments et des installations (Tableau 9).

Pour les mines, différenciées de leur usine de traitement, et le site de stockage Cigéo, l'extension de la mine et les énergies en jeu sont comptabilisées dans le fonctionnement des installations : on n'a donc pas considéré d'énergie liée à la construction avant le démarrage du fonctionnement.

Le poids de ces hypothèses de travail pourra être évalué lors de l'étude de sensibilité si son impact sur le résultat final s'avère non négligeable.

3.4.2 Matériaux de construction

Différentes données sont disponibles dans la littérature pour les étapes de construction de différentes usines du cycle du combustible.

La référence utilisée par le CEA dans de précédentes études est la base de données Ecoinvent alimentée par le Paul Scherrer Institute (PSI) en Suisse.

Cette base a été consultée et utilisée, mais l'examen de certaines données dans le domaine nucléaire, dont la source est pourtant citée et qui ont fait l'objet d'une revue critique, montre que celles-ci semblent caduques ou peu extrapolables. Par exemple, [Dones 2009], citant en référence une usine de traitement du minerai du DOE américain d'une capacité de 470 tU/an en 1993, indique une quantité de béton de 107 000 m³, alors qu'il présente dans un autre rapport un volume de 169 200 m³ pour la construction d'un réacteur électronucléaire de 1000 MW. Une usine de traitement de minerai nécessiterait donc, selon cette source, plus de 60 % du béton nécessaire pour construire un réacteur nucléaire de 1000 MW.

Par comparaison, Orano obtient une valeur de 15 743 m³ pour chaque usine de traitement du minerai du Niger (capacités de production annuelle : 1600 tU pour Cominak, 3000 tU pour Somaïr) et 8 900 m³ pour Katco (capacité de production annuelle : 4000 tU, avec un procédé simplifié). On constate donc une différence parfois significative entre les données Ecoinvent et celles issues des exploitants nucléaires, provenant probablement du type de procédés considérés et des standards de construction appliqués, parfois très différents suivant le type d'installations et les pays ou l'époque considérés.

Aussi, afin de rester sur des données les plus réalistes possibles, les données objet de l'étude issues des exploitants ont été privilégiées lorsqu'elles étaient disponibles. Les principaux besoins en matériaux de construction des usines du cycle consolidés sont ainsi présentés dans le Tableau 9. Les quantités d'énergie nécessaires aux différentes constructions ont été estimées par le CEA d'après la taille des usines.

L'inventaire exhaustif des matériaux nécessaires pour les équipements et appareils de procédé n'a pas pu être réalisé, du fait de données trop parcellaires et hétérogènes. En effet, cet exercice reste complexe à réaliser du fait du très grand nombre de données qu'il nécessite de recueillir et de la grande variété d'alliages utilisés. Cet inventaire doit de plus être réalisé pour l'ensemble des installations du cycle étudié pour permettre *in fine* une comparaison homogène des résultats, inventaire non disponible à ce stade pour toutes les usines.

Tableau 9 : Besoins en matériaux et énergie pour la construction des usines du cycle

Etape	Usine	Source	Production associée (t sauf précision)	Acier de charpente métallique (t)	Armatures à béton (t)	Matériaux						Energies		
						Total acier hors inox (t)	Acier inox (t)	Béton (m3)	Aluminium (t)	Cuivre (t)	Nickel (t)	Energie diesel (MWh)	Energie électrique France (MWh)	Energie charbon (MWh)
Mines	Mine à ciel ouvert	Ecoinvent 2.2	3 600	3 340		3 340		6	19	41		0,00E+00		
	Mine souterraine	Ecoinvent 2.2	3 100	2 230		2 230		1 440	9	9		0,00E+00		0,00E+00
	Mine ISL	Ecoinvent 3.4				3 686		6912				0,00E+00		0,00E+00
	Usine de traitement du minerai Somair		500	9 560	12 800	22 360	3 190	15 743	390	390		80000		2,00E+05
	Usine de traitement du minerai Cominak		500	9 560	12 800	22 360	3 190	15 743	390	390		80000		2,00E+05
	Usine de traitement du minerai Katco	Ecoinvent 2.2 Orano (béton)	4000	9 560	12 800	22 360	1 803	8 900	39	39		40000		1,00E+05
Conversion	Usine conversion	Ecoinvent 2.2	5 000	1 850	64	1 914	pas de valeur	3 710	36	110		777778	1,28E+06	
	CX2 Malvési	Orano	15 000	679	1 056	1 735	925	8 800	18	30		1,17E+06	1,92E+06	
	CX2 Pierrelatte	Orano	15 000	509	2 411	2 920	925	20 100	18	80	50	1166667	1920000	
	Total	Orano		1 188	3 467	4 655	1 850	28 900	36	110		2,33E+06	3,84E+06	
Enrichissement	Usine Enrichissement UCG	Ecoinvent 2.2	8 700	16 300	41 600	57 900		180 000						
	GB2 Sud	Orano	4500	3 550	9 600	13 150		80 000						
	GB2 Nord	Orano	4500	2 850	8 160	11 010		68 000						
	REC2	Orano		111	1 600	1 711		11 000						
	Total	Orano		6 511	19 360	25 871		159 000	660	554	408	27674	59783	
	Socatri					20 000	1 000	50 000	1000	500	100	100000	1,00E+06	
	Usine W					2 000		11 500				50000	2,00E+05	
Fabrication UOX	Usine fabrication UOX	Ecoinvent 3.4	~1000	8 000	21 000	10 400	300	17 500	0,5	330		130000	1,00E+06	
Retraitement	Retraitement actuel	Ecoinvent 3.4	1 200	31 300	53 000	84300	115 000	500 000	130	360		76000	5,00E+06	
	TU5					2 000	200	11 500				50000	1,00E+05	
Fabrication MOX	Usine Mélox	Ecoinvent 2.2	150	3 770	6 630	10 400	180	62 800	150	100		50000	3,00E+05	
Réacteurs		Ecoinvent 3.4	1000 MW			39 270	21 900	169 000	200	1 470		92500	531000	
Stockage surface TFA	CIRES					16700		10000				2000	10000	
Stockage surface FMA-VC	CSA					16700		84000				4200	70000	
Stockage profond HA + MA-VL	Futur Cigéo					80000		400000				0	0	

En gras : donnée Orano 2018

En noir : Ecoinvent

En violet : donnée NELCAS 1

En rouge : valeur estimée

Des codes couleur ont été volontairement introduits dans ce tableau, afin de conserver la traçabilité des différentes sources et montrer parfois leurs écarts. Les écarts les plus marqués concernent essentiellement les usines de conversion et de retraitement.

Pour les centrales EDF, les données disponibles dans Ecoinvent ont été utilisées.

Pour les sites de l'Andra, aucune donnée n'est disponible à ce stade. Néanmoins, dès les premières études d'ACV du CEA avec l'outil NELCAS 1, les quantités de béton et d'acier avaient été estimées pour les deux sites de stockage existants : le centre de stockage des TFA (Cires à Morvilliers) et le centre de stockage des FMA-VC à Soulaines (Aube), dit CSA, ainsi que pour le futur centre de stockage profond (Cigéo). Ces valeurs hypothétiques n'ont pas été discutées avec l'Andra ; elles pourront être intégrées dans l'analyse de sensibilité qui suivra cette étude.

3.5 Inventaire des usines en phase d'exploitation

Les intrants et extrants (consommations, énergies, réactifs, effluents, déchets, ...) de toutes les usines ou ateliers du cycle ont été fournis par les exploitants : ils sont regroupés en 8.1. Ils sont réalisés pour la plupart à partir des données présentées dans les rapports annuels environnement. En l'absence de données quantifiées dans ces rapports, les estimations réalisées sont présentées dans les paragraphes suivants (cas des mines essentiellement).

Pour EDF, les données sont rapportées à 1 réacteur, sachant que l'on distingue les 3 types de tranches : 900, 1300 et 1450 MW, qui n'ont pas les mêmes spectres de rejets et déchets.

Les déchets FA-VL de certaines usines ont été complétés à partir des inventaires de l'Andra et sont regroupés en Annexe 3.

Il convient de signaler qu'aucun seuil de coupure précis n'a été fixé pour la prise en compte ou non d'un réactif donné. Les principaux produits chimiques et ceux essentiels à la transformation de la matière ou au fonctionnement sûr (au sens de la sûreté nucléaire) des installations ont été déclarés par les exploitants ; ils sont souvent utilisés en quantités supérieures à 1 t/an. La diversité des produits chimiques utilisés sur les sites pouvant être parfois très importante, d'autres réactifs, utilisés en plus faibles quantités (réactifs de laboratoire, autres usages, ...), ne sont pas pris en considération dans le cadre d'une étude de ce niveau de détail.

3.6 Émanation de radon

3.6.1 Cas des mines

La détermination du radon total émis doit prendre en compte plusieurs composantes issues des parties suivantes de l'ensemble mine & usine :

- la mine en exploitation, qui inclut aussi souvent les étapes de concassage et broyage (préparation du minerai) ;
- l'usine de traitement, émettrice de poussières aux différents postes selon l'efficacité des dispositifs de filtration ;
- les stériles de découverte et les résidus de traitement du minerai.

Plusieurs méthodes ont été considérées pour calculer les émissions de radon : empirique (basée sur des mesures effectuées sur les mines considérées) et théorique (basée sur des coefficients établis par des études précédentes).

3.6.1.1 Méthode empirique

Orano dispose de résultats de mesures de flux de radon au-dessus des résidus de traitement qui ne sont pas couverts. Les valeurs obtenues pour les usines du Niger sont présentées dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Emissions de radon à partir des flux au-dessus des résidus pour les usines du Niger

Usine	Flux de radon (Bq.m ⁻² .s ⁻¹)	Surface des verses à fin 2017 (ha)	Rejet annuel de Rn222 (TBq/an)
Somaïr	20	65	410
Cominak	18	65	369

Il s'agit d'un rejet annuel qui ne prend pas en compte l'augmentation progressive des résidus et leur devenir après la fin de l'exploitation.

Les quelques évaluations réalisées lors de l'exploitation des mines par Orano semblent montrer un flux annuel de radon globalement équivalent, voire supérieur, au stockage des résidus lui-même.

A Cominak, des valeurs de concentration de Rn222 ont été mesurées au niveau des cheminées des galeries de ventilation, allant de 3600 à 18000 Bq/m³ [Alhacen 2010].

Pour la mine ISL, l'estimation d'émission de radon est basée sur celle de la mine australienne de Beverley : environ 100 GBq/jour, soit un rejet de 43,4 MBq/kgU [Doka 2011]. En considérant une part supplémentaire évaluée à 20 MBq/kgU due au séchage et à la calcination, on retient pour l'usine Katco une émission de radon d'environ 254 TBq/an, pour une production en 2015 de 4007 tU.

Les résultats des émissions totales pour les 3 mines & usines modèles sont présentés dans le Tableau 11.

Tableau 11 : Emissions de Rn222 pour les trois mines & usines « modèles » selon la méthode empirique

Mine & usine modèle	Somaïr	Cominak	Katco
Radon total émis en 2015 (TBq/an)	820	738	254

Il est à noter que les valeurs de la littérature confirment toutes le fait que la contribution très largement prépondérante à l'émission de radon est celle des résidus [Dones 2009], permettant quasiment de négliger les autres.

3.6.1.2 Méthode théorique

[Frischknecht 2000] propose un facteur d'émission à long terme du Rn222 (80 000 ans, ordre de grandeur de la demi-vie du Th230 à 75380 ans, son « grand-père ») de 2E+9 kBq/kgU pour des résidus miniers abandonnés, 33 fois plus élevé que pour des résidus couverts (6E+7 kBq/kgU). La question de la tenue d'une couverture pendant une période aussi longue dépendra probablement davantage des phénomènes d'érosion ou de déposition que de la qualité des barrières ouvragées.

Dans le cas des mines du Niger, les résidus ne sont pas couverts pendant la phase d'exploitation (environ 60 ans), mais ils le seront à la fermeture de la mine, de façon à réduire l'empreinte sur l'environnement due au radon. On serait donc amené à considérer la seconde valeur, qui est 1,7 fois plus élevée que celle prise en compte dans NELCAS 1 [Poinsot 2014] et qui correspond aux rejets résidus couverts pour la zone géographique d'Arlit, d'après le rapport Ecoinvent No. 6-VII "Kernenergie", Chapter 5.

Les rapports Ecoinvent de référence [Dones 2009] proposent des valeurs moyennes d'émission de radon pour les différents types de mines et les étapes de la transformation : 1 TBq/tU pour une mine souterraine, 0,13 TBq/tU pour une mine à ciel ouvert, 0 pour une mine ISL si les puits sont parfaitement

rebouchés après la fin de leur phase de production, 0,15 TBq/tU pour la production de yellow cake et 35 TBq/tU pour les résidus de minerais.

En retenant cette valeur de $6E+7$ kBq/kgU (60 TBq/tU) pour les résidus, les deux mines du Niger ont une émission de radon assimilable à celle des résidus, qui est largement majoritaire.

En prenant pour une usine de traitement la valeur de 0,15 TBq/tU, on obtiendrait alors pour les 3 mines et usines « modèles » d'Orano les valeurs suivantes. Il s'agit bien de facteurs d'émission à long terme, par année de production.

Tableau 12 : Emissions à long terme de Rn222 pour les trois mines et usines « modèles »

	Somaïr	Cominak	Katco
Emission de radon unitaire (MBq/tU)	6,0E+7	6,0E+7	1,5E+5
Emission totale de radon à long terme (TBq/année de production)	151 000	96 400	601

Les valeurs obtenues avec cette méthode sont supérieures d'un facteur 2,4 pour Katco à près de 200 pour Somaïr par rapport à la méthode empirique décrite en 3.6.1.1., méthode empirique qui, basée sur les rejets actuels mesurés, ne considère pas les émissions au-delà de la vie de la mine. L'écart est relativement faible pour une mine ISL telle que Katco, qui ne produit pas de résidus, et se révèle être beaucoup plus important pour les autres types de mine.

Ce sont ces valeurs englobant l'effet à long terme des résidus miniers qui seront prises en compte pour les calculs de l'ACV.

3.6.2 Cas de Malvésí

Une estimation du radon émis par les résidus de traitement de conversion de l'uranium (RTCU), entreposés au niveau de bassins spécifiques sur le site de Malvésí, a été entreprise. Le détail de la méthodologie et les résultats sont reportés en Annexe 2. On retient pour l'émission de Rn222 une valeur de $2,02E+06$ MBq/an.

3.7 Rejets chimiques des mines

3.7.1 Rejets liquides

Ils comprennent les eaux d'exhaure pompées des mines, qui sont traitées pour réduire leur concentration en U et Ra226 avant rejet, et les effluents de lixiviation des résidus de traitement par ruissellement des eaux pluviales.

Au Niger, ces effluents ainsi que ceux récupérés lors des rares pluies sont dirigés vers des bassins d'épandage et d'évaporation qui s'assèchent rapidement compte tenu de la météorologie au Sahara. Ce mode de gestion par concentration / évaporation a été retenu comme le plus adapté localement, en l'absence de réseau hydrologique local (rivières ou fleuves).

Il n'y a donc pas de rejets liquides dans le milieu naturel récepteur, à l'image de la dispersion d'un rejet d'effluents liquides après traitement, dans un grand cours d'eau. Toutefois, les résidus de traitement n'ayant pas tous été historiquement isolés du sol par des géomembranes comme actuellement, on ne peut exclure que des infiltrations puissent se produire vers le sous-sol, entraînant un risque de marquage chimique et radiologique des nappes à terme. Cette problématique fait d'ailleurs l'objet d'une surveillance environnementale locale adaptée.

Ecoinvent donne des rejets unitaires en différents métaux (quelques kg/tU) et anions pour des mines américaines anciennes, avec des concentrations mesurées sur les lixiviats naturels issus des résidus

[Dones 2009]. Il convient d'utiliser ces valeurs avec circonspection et ne pas les extrapoler directement au Niger, car les conditions hydrologiques sont très différentes.

Il a ainsi été décidé d'envisager deux scénarios de rejets :

- « *sans rejets liquides* », reposant sur le mode de gestion actuel des mines du Niger, dont les rejets procédé sont gérés par concentration / évaporation en bassins séparés, et qui sont donc sans impact sur l'indicateur de toxicité aquatique ;
- « *avec rejets liquides* », selon une approche majorante en ACV consistant à considérer qu'une certaine fraction des métaux solubilisés lors des pluies peut s'infiltrer dans le sous-sol et à terme vers les nappes, abstraction faite de la connaissance du réseau hydrogéologique local. La difficulté consiste à déterminer cette fraction mobilisable, qui dépend de nombreux paramètres comme la composition du minerai et la spéciation des espèces, l'acide résiduel imprégnant les résidus, la perméabilité des verses (variable selon le tassement progressif) et du sous-sol, la géométrie du terrain autour des verses (écoulement naturel vers un point de collecte ou dispersion). Retenir une valeur réaliste, probablement très faible sur les sites de Somaïr et Cominak, dépasse largement le cadre de cette étude.

Cette seconde option est à considérer en se rappelant que les mines nigériennes sont des mines choisies pour représenter un certain type d'exploitation minière. Les mines réellement utilisées connaissant des conditions pluviométriques parfois très différentes des conditions du Niger, il nous faut prendre en compte ces phénomènes de lixiviation, afin de prendre en compte l'impact complet des différents types de mines. Dans cette optique, on retiendra donc les valeurs d'Ecoinvent, corrigées seulement des rapports de pluviométrie entre le Nord Saskatchewan (216 mm/an à Uranium City) et la région d'Arlit au Niger (112 mm/an à Agadez).

Les rejets liquides potentiels des mines et leur impact sur l'écotoxicité aquatique sont considérés pour une échelle de temps correspondant à leur durée d'exploitation, arrondie à 50 ans. La durée de vie totale considérée est de de 100 ans. Les résidus seront recouverts avec des géomembranes après la fin de l'exploitation, mais la tenue à long terme ne peut être garantie et l'approche ACV considère que les rejets chimiques peuvent perdurer au-delà de la durée d'exploitation et de surveillance.

Les données prises en compte pour l'option « avec rejets liquides » sont rassemblées dans le Tableau 13 [Dones 2009]. On notera que certains éléments, qui possèdent une valeur de rejet unitaire soit pour une mine à ciel ouvert (MCO) soit pour une mine souterraine (MS) n'ont pas été retenus car a priori absents du minerai : c'est le cas du Cd, du Zn, du Se et du Ba pour les deux mines nigériennes, du V à Somaïr et du Zr à Cominak. Les valeurs unitaires pour l'U et le Zr, absentes de la documentation, ont été extrapolées (en bleu dans les tableaux).

La limite de cette méthode réside aussi dans le fait que les rejets potentiels issus des résidus dépendent de la production d'uranium, alors qu'en réalité la lixiviation naturelle se produit sur les résidus des années précédentes.

Tableau 13 : Rejets liquides potentiels par les résidus de traitement des mines

Elément	Rejets unitaires MCO (kg/kg U produit)	Rejets potentiels Somaïr (t/an)	Rejets unitaires MS (kg/kg U produit)	Rejets potentiels Cominak (t/an)
Al	3,10E-03	4,03	2,50E-03	2,08
NH ₄	8,50E-03	11,1	6,50E-02	54,2
As	9,30E-05	0,12	6,80E-05	0,06
Pb	1,80E-02	23,4	1,30E-02	10,8
Cd	9,30E-05		6,80E-05	
Cl	8,60E-01	1119	6,00E-01	500
Fe	3,40E-02	44,2	1,10E-01	92
Mn	6,90E-02	89,8	7,50E-04	0,62
Mo	1,60E-03	2,08	1,80E-02	15,0
NO ₃	9,30E-03	12,1	4,10E-02	34
Se	1,90E-03		4,10E-04	
SO ₄	4,80E+00	6245	3,40E+00	2833
V	6,50E-03		4,80E-03	4,0
Zn	1,20E-03		8,90E-04	
U	9,25E-04	1,2	9,25E-04	0,8
Zr	4,63E-03	6,0	4,63E-03	

Pour une mine ISL, la problématique est différente car elle présente l'avantage de ne pas produire de résidus de traitement en surface, mais aussi l'inconvénient d'injecter dans le réseau géologique souterrain des solutions acides, dont une fraction ne pourra pas être récupérée. Pour les puits du site de Katco, Orano annonce un taux de fuite global variant entre de 5 à 20 %. On retiendra en première approximation un taux de fuite d'acide sulfurique vers le sous-sol de 10 % de la quantité introduite (soit 17782 t/an), identique dans les deux options de chaque scénario.

3.7.2 Rejets de poussières atmosphériques

Les données disponibles sur les rejets des installations Orano du Niger présentent la composition d'un certain nombre de métaux lourds dans les poussières atmosphériques émises, comprenant à la fois les rejets canalisés vers les cheminées et les rejets diffus.

Tableau 14 : Masse de poussières et polluants émis par les mines & usines d'uranium nigériennes (t/an)

Usine	Poussières totales (PM10)	Poussières hors métaux analysés	U	Pb	As	Mo	Zr	Fe	V
Cominak	20,2	19,3	0,141	0,693	1,39E-03	6,69E-03	1,11E-02		3,31E-02
Somaïr	141,4	138,4	0,1897	2,01	4,04E-04	6,26E-03	4,76E-03	7,79E-01	

Les poussières globales interviennent dans la catégorie « respiratory inorganics » qui n'est pas considérée dans le cadre de cette étude en raison d'un manque de données homogènes pour l'ensemble des usines. Elles seront toutefois prises en compte par une simple somme pour les usines qui en ont déclarées.

Les polluants élémentaires sont pris en compte dans les catégories « carcinogens » et « non carcinogens » d'IMPACT2002+, avec des facteurs de caractérisation (FC) relatifs au compartiment air. Les valeurs retenues sont présentées dans le Tableau 15.

Tableau 15 : Facteurs de caractérisation de différents polluants sous forme de poussières

Elément	Catégorie		
	non carcinogens	carcinogens	aquatic ecotoxicity
	kg C ₂ H ₃ Cl/kg		kg TEG water/kg
As	12487	1244	54845
V	72,0	16,6	146740
Pb	2,6	20	40064
U	2,6	20	146740
Mo	72	541	3451
Zr	72	16,6	3451
Fe	72	16,6	0
Ni	8,87	2,83	178700
Cr	18,0	122	67045

Tous les FC ne sont pas disponibles dans la base de données consultée en priorité.

Pour évaluer un FC manquant dans la méthode utilisée, nous avons considéré que les ratios établis entre les FC de deux éléments dans une autre base de données devaient être conservés.

Les valeurs en bleu ont été obtenues par conversion à partir d'autres méthodes, dont essentiellement ILCD 2011 ; celles en rouge ont été estimées par une analogie de toxicité entre des éléments ayant des propriétés voisines, en modulant selon les compartiments (par exemple, l'U et le Pb sous forme de poussières sont considérés comme analogues pour la santé humaine dans les catégories « carcinogens » et « non carcinogens », mais pas pour l'écotoxicité aquatique, où l'U est considéré comparable au V).

Ces approximations sont sujettes à caution en l'absence de concertation avec les experts du domaine ; elles mettent en évidence le manque de données d'impact dans les méthodes les plus reconnues. Les FC manquants des poussières dans ces catégories pourraient faire l'objet d'une étude de sensibilité pour vérifier l'impact des extrapolations effectuées (ex : FC du Ni pour l'indicateur « carcinogens » plus importante).

3.8 Transports

3.8.1 Transport des matières nucléaires et déchets

L'impact des transports est évalué pour les matières nucléaires, ainsi que pour les déchets lorsqu'ils sont évacués vers les sites de stockage en France, au travers du processus suivant :

- Prise en compte de la masse nette de matière transportée, en considérant la nature chimique des matières du cycle (hors déchets) ;
- Détermination du facteur de masse, c'est-à-dire du rapport de la masse brute de l'emballage et du moyen de locomotion à la masse nette de matière ;
- Calcul du produit « tonne brute.km » ;
- Application d'un coefficient de rejet de polluants (limité à CO₂, SO₂ et NO_x) caractéristique du mode de transport [Ecoinvent 3.1] ; cf. Tableau 16. Ces coefficients sont revus régulièrement par les spécialistes d'Ecoinvent et correspondent au plus juste de la technologie (ils ne sont pas majorants). La norme EURO III a été retenue pour l'évaluation des rejets associés aux transports dans les pays miniers tels que le Niger et le Kazakhstan (norme appliquée en Europe à partir de 2001), et la norme EURO VI plus récente pour la France (norme appliquée depuis 2009) ;
- Un processus identique est utilisé pour l'évaluation de l'impact des transports des 4 catégories de déchets radioactifs (TFA, FMA-VC, MA-VL et HA), en prenant en compte les distances, les modes de transport et les emballages spécifiques, avec des hypothèses concernant la densité des différents types de déchets produits par les installations (car les quantités de déchets sont exprimées en volume).

On peut finalement additionner les différentes contributions de toutes les étapes pour les différents polluants.

Tableau 16 : Coefficients de rejets de polluants pour les différents modes de transport

Mode de transport	CO ₂ kg/(t.km)	SO ₂ kg/(t.km)	NO _x kg/(t.km)
Freight train FR	2,14E-03	4,08E-07	3,74E-05
Freight train, electricity Europe	2,13E-03	4,06E-07	3,72E-05
Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO6 RER	1,49E-01	7,40E-07	6,38E-05
Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 RoW	1,52E-01	7,55E-07	1,14E-03
Transport, freight, sea, transoceanic ship GLO	7,79E-03	1,20E-04	1,36E-04

Nota : les intitulés des modes de transport sont volontairement indiqués en anglais dans un souci de traçabilité par rapport aux fiches d'inventaire Ecoinvent.

Légende : RER : Europe, RoW : « rest of the world » (hors Europe), GLO : global (moyenne mondiale)

Il convient de noter que seuls 3 types de substances sont pris en compte dans cette évaluation sur les transports ; d'autres émissions comme les particules et les COV ne sont pas considérées, en raison de coefficients très faibles, mais du même ordre de grandeur que celui du SO₂. Une estimation plus fine pourra être réalisée dans un second temps si la part des transports devait être significative par rapport au bilan du cycle global.

Un certain nombre d'hypothèses ont été nécessaires pour réaliser les calculs de façon aussi rigoureuse que possible, bien que simplifiée :

- Les transports de matières nucléaires entre les étapes n et n+1 du cycle sont attribués à l'étape n+1, ce qui présente le double avantage de les réaffecter simplement à l'usine n+2 si la n+1 est supprimée (intéressant pour le passage du cycle actuel au cycle ouvert) et pour les différentes mines de les affecter à l'usine de conversion quel que soit le mix minier ;

- A l'inverse, les transports de déchets sont affectés à l'usine de départ qui les a générés ;
- Les transports de matières nucléaires ou liés à l'entreposage de déchets sur un même site, ne sont pas comptabilisés dans la mesure où les distances restent négligeables (quelques km de trajet au maximum sur un site étendu tel que le Tricastin) ;
- Certains transports par train utilisent parfois une traction par moteur diesel pour effectuer de courtes distances, par exemple pour rejoindre une gare de triage proche (cas de Malvésí jusqu'à Narbonne) avant de poursuivre avec une traction électrique. Dans ce cas, seule la partie électrique a été comptabilisée, en vérifiant qu'elle reste largement majoritaire ;
- Pour les matières nucléaires aussi bien que pour les déchets, les facteurs de masse sont établis avec les conteneurs les plus récents, mais il est parfois difficile de déterminer la densité moyenne de certains types de déchets qui nécessiterait une étude des flux détaillée (cas des déchets FMA-VC des centrales) ;
- Certains modes de transport ont été estimés : tous les déchets des centrales sont considérés envoyés à l'Andra par route ;
- L'entreposage de combustibles usés est pris en compte au moyen des piscines de La Hague pour les combustibles MOX du cycle actuel et de piscines de grande taille supposées dans le cadre de cette étude au centre de la France¹ pour les combustibles UOX usés du cycle ouvert ; dans les deux scénarios, on identifie des transports vers Cigéo à Bure.

3.8.2 Transport des matériaux de construction, déchets de démantèlement et réactifs

Compte tenu de l'indisponibilité de données consolidées liées à des transports passés (matériaux de construction des usines) ou futurs (matériaux issus des futurs démantèlements), le groupe de pilotage a décidé de ne pas prendre en compte les transports associés à ces opérations.

Il en est de même pour les réactifs, pour lesquels les transports jusqu'aux usines concernées dépendent du choix des fournisseurs, fluctuant dans le temps, et plus généralement des politiques « achats » des acteurs industriels.

Il est cependant possible de justifier que les transports associés à ces opérations seraient semblables pour les deux cycles considérés, ouvert ou actuel, sauf pour les étapes de l'amont du cycle pour lesquelles les besoins en uranium naturel, donc en réactifs de transformation également, sont plus élevés pour le cycle ouvert (+ 10 % en besoin annuel d'uranium). Ce n'est en revanche pas le cas pour l'aval du cycle qui ne concerne que le cycle actuel.

Ce point pourra être affiné ultérieurement si l'impact de ces transports devait avoir une contribution importante au final.

3.9 Flux de déchets HA et MA-VL

Des évaluations détaillées pour les déchets de moyenne et de haute activité ont été nécessaires pour pouvoir décrire et comparer le fonctionnement précis des deux scénarios de l'étude.

Pour le cycle actuel, les volumes des différentes catégories sont précisés dans le tableau suivant :

¹ A la date de sortie de cette étude, aucune décision n'a été prise quant à la localisation d'une nouvelle piscine de descattivation

Tableau 17 : Volume des déchets HA pour le cycle actuel

Type de conteneur	MOX usés	CSD-V (verres)
Nombre annuel	278 assemblages	848 (2016)
Volume unitaire (m ³)	0,361 (avec étui)	0,18
Volume total (m ³)	100,4	152,6
Volume total (m ³ /réacteur.an)	2,953	

Il convient de noter que dans NELCAS, la production de l'usine de La Hague en 2016 est de 1118 tMLi, soit 1052 t URT. L'équilibrage du cycle réclame de traiter 1069 tMLi, soit 1005,7 t d'URT. Pour tenir compte de cet écart (écart entre un réalisé et un cycle à l'équilibre) sur le tonnage traité, NELCAS effectue une légère correction d'un facteur 0,956 (1069/1118) appliquée aux flux sur les usines, y compris pour les quantités de colis de déchets, soit 811 CSD-V et 701 CSD-C. Les déchets sont produits dans les proportions de 0,758 CSD-V par tMLi et de 0,655 CSD-C par tMLi.

Pour les déchets MA-VL issus du retraitement, les données sont rassemblées dans le Tableau 18.

Tableau 18 : Volume des déchets MA-VL au traitement pour le cycle actuel – 1118tMLi (2016)

Nature des déchets	Coques et embouts	Technologiques cimentés
Type de conteneur	CSD-C	CBF-C'2 (béton-fibre)
Nombre annuel	733 (2016)	285
Volume unitaire (m ³)	0,18	1,18
Volume total (m ³)	132	336

Le volume des CBF-C'2 a été estimé sur la base d'une production d'environ 0,3 m³/t ML de déchets technologiques. On aboutit à 468 m³ de déchets MAVL. Pour le cycle, NELCAS effectue une correction d'un facteur 0,956 soit au total 447 m³ de déchets MAVL issus du retraitement.

Pour le cycle ouvert, les déchets HA sont constitués des combustibles usés, dont les données de base sont rassemblées ci-dessous :

Tableau 19 : Volume des déchets HA pour le cycle ouvert

Tranche de réacteur (MW)	900	1300	1450
Nombre d'assemblages UOX déchargés par an	1310	897	207
Volume d'un assemblage avec étui (m ³)	0,361	0,425	0,425
Volume total UOX utilisé (m ³ /réacteur.an)	13,9	19,1	22,0

Dans les deux scénarios, le volume annuel des déchets MA-VL des 58 réacteurs est de 0,83 m³/réacteur soit environ 48 m³/an. Il s'agit des grappes poisons destinées à réduire la réactivité des cœurs lors de leur premier démarrage et retirées en fin d'irradiation, des grappes de commande destinées à assurer le pilotage des réacteurs et leur arrêt ainsi que diverses pièces métalliques situées dans le voisinage du cœur [Saturnin 2018].

3.10 Entreposages

3.10.1 Données de base

Les entreposages de combustibles usés, de déchets issus de retraitement et de matières valorisables (U appauvri, URT) ont été considérés uniquement du point de vue de leur emprise, à défaut de connaître précisément les inventaires de réactifs et d'énergie associés, souvent indissociables des bilans des usines dans lesquelles ils sont situés. En suivant les préconisations de la norme ISO 14040, cet inventaire sera approfondi si l'impact de certains de ces entreposages s'avère conséquent.

Les données sont rassemblées dans les Tableaux 21 et 22.

Tableau 20 : Données de base pour les entreposages (1/2)

Masse maximale de CU UOX ou MOX (tML/piscine)	5000
Nombre de colis CSD-V par module	4320
Nombre de colis CSD-C par module	24000
Surface d'entreposage U appauvri DV70 (parc, m ² /tU)	0,274
Surface d'entreposage URT en fût (parc, m ² /tU)	2,452

La surface unitaire effective d'entreposage plus de 5 fois plus élevée pour l'URT que pour l'uranium appauvri s'explique par le fait que l'URT, pour lequel il est aujourd'hui prévu un recyclage dans les REP, n'est pas compacté et qu'il est conditionné en fûts cylindriques de 200 L, alors que l'uranium appauvri l'est dans des conteneurs parallélépipédiques DV70 de 3,3 m³.

Tableau 21 : Données de base pour les entreposages (2/2)

Type de produit	Surface unitaire entreposage (m ²)	Installation de référence	Durée minimale de refroidissement (ans)
Combustibles usés UOX	1840	piscine E La Hague	60
Combustibles usés MOX	1840		90
CSD-V	960	alvéole 30 atelier EEV La Hague	60
CSD-C	2800	atelier ECC La Hague	10 (colis non thermique) mais uniformisé à 60

3.10.2 Cas de l'uranium appauvri et de retraitement

L'uranium appauvri et de retraitement sont des matières valorisables qui sont entreposées en attente de réutilisation : c'est le cas en particulier de l'URT qu'EDF envisage de réintroduire sous forme de combustible URE à partir de 2023, après l'avoir fait de 1994 à 2013. Pour l'uranium appauvri, dans le scénario étudié, quelques 120 tonnes par an sont utilisées pour alimenter la fabrication des combustibles MOX. Les 7300 tonnes supplémentaires produites par an sont entreposées, en attente d'utilisation en réacteurs de génération IV, de ré-enrichissement pour utilisation dans des REL, et/ou d'une valorisation autre que dans l'électronucléaire.

Dans le cadre du scénario étudié, qui ne considère que le monorecyclage du seul plutonium sans autre valorisation, l'uranium appauvri et l'URT contribuent à l'augmentation d'un stock devant faire l'objet d'un stockage FA-VL.

Pour les besoins de l'étude ACV, nous avons donc considéré ici que les matières issues du fonctionnement des usines W et TU5 sont stockés en catégorie FA-VL en fonctionnement, qui seront comptabilisés dans les volumes de chaque catégorie de déchets radiologiques.

Les volumes correspondants, tels qu'ils sortent des deux usines, ont été déterminés avec leur conditionnement adapté à un entreposage en parc (hangars fermés) ; les valeurs figurent dans le tableau suivant.

Tableau 22 : Volumes FA-VL entreposés pour l'U appauvri et l'URT

Type d'emballage	Cycle actuel		Cycle ouvert
	U appauvri	URT	U appauvri
	cube DV 70	fût 200 L	cube DV 70
Volume unitaire emballage (m ³)	3,408	0,2	
Nombre d'emballages en 2016	1139	4298	
Production 2016 (tU/an)	10390	1085	
Production nécessaire pour le cycle associé (tU/an)	7425	1006	8270
Volume annuel à entreposer pour le cycle (m ³ /an)	2774	797	3090
Volume annuel à entreposer pour le cycle (m ³ /tU)	0,374	0,792	0,374

Toutefois, dans la perspective d'un stockage de longue durée de ces matières, et à des fins d'optimisation, il est raisonnable de considérer que l'URT serait compacté, comme l'uranium appauvri en sortie de l'usine W, et reconditionné dans des conteneurs similaires aux DV70, plutôt que dans les fûts métalliques de 200 L utilisés aujourd'hui pour l'URT.

Compte tenu des productions de 2016, les volumes à stocker sont donc calculés avec le volume unitaire de 0,374 m³/tU. Les résultats sont présentés dans le Tableau 23.

Tableau 23 : Volumes annuels à stocker pour l'U appauvri et l'URT dans le cycle actuel (année 2016)

U appauvri (m ³ /an)	URT (m ³ /an)
3886	406

Ces valeurs ont été introduites dans l'outil NELCAS, qui recalcule les valeurs pour les productions des cycles considérés. On notera que le compactage de l'URT, dans l'hypothèse d'économiser le volume à stocker dans le futur centre FA-VL, n'a que peu d'influence sur le volume total : avec le volume unitaire de 0,792 m³/tU, on aurait obtenu 860 m³ URT/an soit pour l'ensemble U appauvri + URT un volume de 4746 m³/an au lieu de 4292 m³/an, soit 10% de plus.

3.10.3 Modélisation de l'entreposage des combustibles usés

Un effort particulier a été effectué pour modéliser le plus précisément les entreposages importants, à savoir essentiellement ceux des combustibles usés. Avec les données précédentes, les calculs conduisent à un besoin d'un peu plus de 2 piscines pour l'entreposage des MOX usés du cycle actuel pour permettre un refroidissement de 90 ans ; 5 piscines existent déjà à La Hague, d'une capacité totale de 14 400 tML [laradioactivite.com 2018] et ne doivent pas être comptées deux fois puisque l'entreposage a déjà été créé. L'hypothèse de 90 ans est conservatrice pour le dimensionnement actuel de Cigéo et pourrait être revue à la baisse en cas de décision politique de lancer un parc de réacteurs rapides de génération IV, puisqu'il nécessiterait le retraitement des combustibles MOX pour alimenter les dits réacteurs en plutonium.

En revanche, pour le scénario d'un « cycle ouvert », il est nécessaire de construire 15 piscines du type « piscine E » de La Hague, de capacité unitaire 5000 tML, pour entreposer les UOX usés pendant 60 ans au rythme de 1200 tML/an.

Etant donné qu'en ACV, on se place à l'équilibre, on considère que les 15 piscines sont construites et fonctionnent à plein régime et que chaque année, 1200 tML sont déchargées pour partir à Cigéo et que 1200 tML sortant des réacteurs entrent dans ces piscines. C'est ce fonctionnement en régime nominal qui a été décrit dans l'outil NELCAS. La construction progressive des piscines, au rythme d'une nouvelle tous les 4,2 ans en cycle ouvert, et le fonctionnement nominal des 15 unités atteint seulement au bout de 60 ans, n'est pas prise en considération dans cette étude.

Les données de construction et de fonctionnement (limitées pour ce dernier à l'énergie liée à la ventilation des piscines, à la circulation de l'eau de refroidissement et la consommation de résines échangeuses d'ions pour l'épuration des traces de radioéléments) et le détail des hypothèses et calculs figurent en Annexe 6.

3.11 Stockage des déchets

Le stockage des déchets TFA au Cires et FMA-VC au CSA est détaillé au paragraphe 3.4 et ne sera pas rappelé ici.

Par contre, pour les déchets HA et MA-VL destinés à rejoindre Cigéo, les valeurs unitaires de volumes à excaver, ainsi que l'énergie associée et les matériaux de consolidation des alvéoles, sont précisés dans le Tableau 24 dans un souci de traçabilité. Ils se rapportent au dimensionnement thermique du centre de stockage [ANDRA 2010, 2012].

Tableau 24 : Données de base pour les déchets destinés à Cigéo

Type de déchets	Assemblage UOX	Assemblage MOX	Conteneurs verre CSD-V	Conteneurs CSD-C	Conteneurs déchets techno cimentés
Volume unitaire (m ³)	0,186	0,186	0,175	0,175	1,18
Volume excavé unitaire pour le stockage (m ³ /unité)	94	379	55	7,3	21
Electricité unitaire (MWh)	83,1	335	48,4	6,5	18,8
Béton (m ³ /unité)	50	50	29	1	2
Acier (t/unité)	4,2	4,2	1,6	1,56	0,27

3.12 Déchets et énergies liés à la déconstruction

Les données nécessaires à l'évaluation des déchets de déconstruction proviennent des différents inventaires réalisés par les acteurs du nucléaire.

Les déchets de démantèlement ont été évalués pour l'ensemble des usines du cycle, à partir de données transmises par Orano [loi TSN 2006] et complétées le cas échéant par le CEA [Saturnin 2017] (cf. Tableau 25).

L'énergie nécessaire pour les différentes opérations de démantèlement dépend considérablement du scénario retenu, très différent d'une usine à l'autre. Certaines estimations consistent à prendre un pourcentage de l'énergie de construction (entre 30 et 200 %), mais qui ne reposent sur aucune expérience validée : même si l'exercice est difficile, le CEA considère qu'il n'est pas raisonnable de faire abstraction de cette énergie, de la même façon qu'à la construction. L'hypothèse est faite que l'énergie de chantier de déconstruction est la même que celle du chantier de construction, pour toutes les usines.

En ACV, les impacts du démantèlement sont répartis sur la durée de vie de l'usine, comme pour la construction.

Tableau 25 : Production de déchets conditionnés de démantèlement des usines du cycle

Etape cycle	détail de l'INB / ICPE	Libellé	Commentaires	TFA(t) = TFA (m3)	FA-VL(m3)	FMA-VC(m3)	MA-VL(m3)
Mines	Mines	Niger, Kazakhstan	Par mine	non comptabilisé			
	Usines de traitement	Niger	Par usine	15743			
Kazakhstan			8900				
Conversion	ICPE conversion Malvési	CXI	ensemble des usines	14180	40000		
	Conversion Pierrelatte		avec INB 105 (option 3: St2000, 2450, cheminée usine, aires)	17464	330		
	TOTAL CONVERSION actuelle	CXI	ICPE + INB 105 (hors INB 175 Ecrin sur	31644	40330		
Enrichissement	ENRICHISSEMENT INB 168	GBII	Usines GB II Nord et Sud + REC II	23244			
	DEFLUORATION INB 155 Services (INB 138)	W SOCATRI	usine de défluoration	1363 1615			
	TOTAL ENRICHISSEMENT	GBII + W	Usines GB II + REC II + W	26222			
	Fabrication UOx	INB 98	Romans	Framatome	44 246	4029	609
Réacteurs	EDF		Par réacteur, identique pour les 3 puissances	12 000	0	6000	160
Retraitement	LA HAGUE (INB 116+117+118+33+38)	Usine UP3 + UP2 800	Usines de retraitement	54049	5362	30760	718
	PIERRELATTE INB 155	TU5	Usine de traitement	965			
	MELOX INB 151	MELOX	INB 151 (CDE/DEM)	2123	806	4731	305
	TOTAL RETRAITEMENT	Retraitement	La Hague + TU5 + MELOX	57137	6168	35491	1023

Légende : données Orano / données publiques Andra ou exploitées par le CEA

En l'absence d'évaluation quantitative précise des déchets conventionnels qui seront produits lors du démantèlement des installations (très dépendante des stratégies de démantèlement retenues, variables d'un exploitant à un autre, et des contraintes réglementaires futures relatives à l'assainissement), cette catégorie de déchets liée aux démantèlements ne sera donc pas prise en compte dans le cadre de cette étude.

Ceci impacte le périmètre des données utilisées entre le démantèlement et les autres étapes de la vie des installations du cycle (construction et fonctionnement) et aura une certaine influence sur la comparaison entre les deux scénarios car il n'y pas le même nombre d'usines dans les deux cas.

Il convient de prendre en compte les déchets FA-VL, dont la future solution de stockage est actuellement étudiée par l'ANDRA (concept de stockage en sub-surface). L'Annexe 3 récapitule l'inventaire de ces déchets déclarés par les producteurs [ANDRA 2018].

Quelques précisions méritent d'être faites :

- Les boues de lavage des conteneurs d'UF₆, produites à Pierrelatte et constituées essentiellement d'uranium naturel, seront affectées à la conversion ;
- Les résidus de traitement de conversion de l'uranium (RTCU) seront pris en compte à hauteur des valeurs publiées par l'ANDRA ;

- Les fûts de résidus de carbochloration et de sublimation de Cezus (Framatome) à Jarrige seront affectés à hauteur des productions respectives des deux usines de fabrication de combustibles (Romans et Mélox), en l'absence de prise en compte de la filière de fabrication du zircaloy dans cette étude. Ceci n'a pas d'impact sur la comparaison cycle ouvert / cycle actuel, car le nombre de tubes de zircaloy est la même pour les deux cycles.

4 METHODE DE CALCUL DES INDICATEURS D'IMPACT POTENTIEL ACV

4.1 Choix des indicateurs

Il existe de multiples méthodes de calcul d'impact en ACV, chacune possédant ses propres catégories ou unités. Si une statistique d'utilisation précise est délicate à établir compte tenu du nombre de publications dans des domaines industriels très différents, 3 méthodes semblent être largement utilisées à l'international : IMPACT2002+, ILCD 2011 et RECIPE [JRC 2011], qui sont revues et mises à jour régulièrement. Certaines catégories de la méthode IMPACT2002+ ont été sélectionnées pour cette étude.

Pour une application à l'énergie nucléaire, il a été jugé nécessaire de retenir en complément des indicateurs spécifiques, en particulier pour ce qui concerne les déchets nucléaires. Les catégories d'impact retenues sont présentées dans le Tableau 26.

L'unité fonctionnelle sera la production d'1 MWh d'électricité nucléaire nette produite et injectée dans le réseau, en prenant en compte toutes les installations nécessaires du cycle français.

Tableau 26 : Catégories d'impact retenues pour l'étude

Cible	Catégories d'impact	Unités
Environnement	Réchauffement climatique	kg CO ₂ eq
	Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC-11 eq (CCl ₃ F)
	Acidité terrestre	kg SO ₂ eq (rejets de SO ₂ qui acidifient les sols)
	Eutrophisation aquatique	kg PO ₄ eq
	Ecotoxicité aquatique	kg TEG eau
	Occupation du sol	m ²
	Consommation d'eau	m ³
	Extraction des ressources minérales	limité à l'uranium (t U)
Homme	Produits cancérigènes	kg C ₂ H ₃ Cl eq
	Produits non cancérigènes	kg C ₂ H ₃ Cl eq
Spécifique du nucléaire	Radiations ionisantes	Bq C14 eq
	Production de déchets radioactifs (5 catégories : TFA, FMA-VC, FA-VL, MA-VL, HA)	m ³
	Surface des entreposages	m ²

Plusieurs catégories de la méthode IMPACT2002+ n'ont pas été retenues pour cette étude en première approche :

- les poussières (« respiratory inorganics »), dont la quantification des émissions est très variable entre installations, mais qui représente des quantités généralement très faibles pour des installations nucléaires qui pour la plupart sont équipées de filtration de très haute efficacité (cf. § 3.7.2) ;
- les polluants organiques (« respiratory organics », en kg d'éthylène équivalent) relatifs aux irritants pulmonaires issus de l'oxydation photochimique ; jugés peu représentatifs du cycle du combustible où les matières manipulées sont à majorité minérale. D'autres méthodes déterminent le potentiel de création d'ozone photochimique (« POCP » en anglais), dû essentiellement aux composés organiques aromatiques et insaturés, ainsi qu'à quelques oxydants minéraux (NO_x et SO₂), qui dépend fortement des conditions locales [Derwent 1996] ;
- l'écotoxicité terrestre (en équivalent triéthylène glycol dans le sol) ; jugé peu représentatif en l'absence de rejets canalisés de ce type de substances dans les sols ; l'impact sur le sous-sol lié aux modes de gestion de certains déchets de l'amont (résidus miniers) est évalué via l'indicateur sur l'écotoxicité aquatique ;
- l'occupation du sol (« land occupation », en m² de surface arable), car la surface occupée par les différentes installations (m²) est déjà prise en compte dans les inventaires réalisés ;
- l'énergie non-renouvelable (en MJ d'énergie primaire), les énergies fossiles étant déjà prises en compte dans l'inventaire ;
- l'extraction de ressources minérales (en MJ ou kg fer équivalent dans le minerai), qui mériterait éventuellement d'être considérée ultérieurement pour ne pas se limiter à l'extraction de l'uranium

La méthode IMPACT2002+ ne semble pas particulièrement adaptée pour une étude de l'impact sanitaire des poussières émises par les installations industrielles. En effet, si les facteurs de caractérisation dépendent de la granulométrie des particules émises (0,536 kg PM 2,5 eq/kg pour des diamètres compris entre 2,5 et 10 µm, 1 en-dessous), la nature chimique n'est pas prise en compte.

Orano a effectué pour les mines du Niger une évaluation de la composition chimique moyenne des poussières rejetées, permettant d'accéder aux masses des différents métaux rejetés (U, Mo, V, Pb, As,...). En l'absence de données sur la granulométrie précise, ces données n'ont pas pu être exploitées dans le calcul d'impact, ce qui constitue une voie potentielle d'amélioration de la méthode.

4.2 Cas des réactifs

4.2.1 Méthodologie

Les publications en ACV qui prennent en compte les procédés ou produits « *du berceau à la tombe* » ne présentent généralement pas de façon détaillée la manière dont la fabrication des réactifs est considéré dans les bilans, alors qu'ils sont comptabilisés dans les inventaires et sont par conséquent inclus dans les calculs d'impact effectués par les logiciels spécialisés (SimaPro, GaBi,...).

En particulier, le logiciel SimaPro considère le réseau de toutes les ressources nécessaires à la fabrication d'un réactif donné, en remontant jusqu'aux ressources primaires naturelles. A chaque étape, l'ensemble des intrants (ressources, eau, énergie) et des extrants (rejets liquides et gazeux, déchets) sont pris en compte dans l'inventaire global, pour peu que les facteurs de caractérisation correspondant aient été déterminés pour la méthode choisie, validés, et entrés dans SimaPro ; cela peut ainsi conduire à des milliers de nœuds dans le réseau, mais avec potentiellement un manque d'homogénéité dans la prise en compte des impacts de certains réactifs.

A titre d'exemple, le cas de la fabrication de l'acier est présenté, qui comporte 4 étapes principales : extraction du minerai de fer, enrichissement du minerai, fabrication de la fonte et élimination du carbone pour obtention finale de l'acier. On ne retient pour la démonstration que la catégorie d'impact « acidification aquatique », pour laquelle les résultats sont récapitulés ci-dessous.

Le Tableau 27 compare les résultats obtenus en retenant soit la dernière étape (fabrication de l'acier à partir de la fonte), soit l'ensemble des étapes (dite méthode complète).

Tableau 27 : Comparaison des impacts sur l'acidification aquatique de la fabrication de l'acier, selon la stratégie

Rejets	Méthode simplifiée			Méthode complète
	Quantité rejetée à la dernière étape (kg/t réactif)	FC Impact2002+	Impact acidification aquatique	Impact2002+
CO ₂	0,0756	0	0	
NO _x	1,25E-05	0,7	0,56	
SO ₂	0	1	0	
Total			0,56	2,54

On obtient un impact 5 fois plus faible pour la catégorie « acidification aquatique » en considérant la dernière étape plutôt que l'ensemble du processus de fabrication.

Cette démonstration est valable pour toutes les catégories d'impact, avec pour chacune un écart plus ou moins grand. Il a donc été considéré comme nécessaire de prendre en compte les impacts de la fabrication des réactifs avec la méthode complète, ce qui a pu être effectué à l'aide d'un logiciel professionnel (SimaPro dans le cas présent).

Le logiciel NELCAS n'étant pas couplé à une base de données permettant pour les réactifs de remonter tous les niveaux, nous avons calculé les impacts de la fabrication d'1 tonne de réactif par la méthode IMPACT2002+ v2.11 grâce au logiciel SimaPro. Ces impacts unitaires, pour chaque réactif, ont été intégrés dans NELCAS, de façon à être multipliés par les quantités réelles de réactifs nécessaires au cycle.

4.2.2 Choix des substituts

Ce couplage manuel a permis d'identifier un certain nombre de réactifs ne figurant pas dans la base Ecoinvent, couplée à SimaPro. Il a été nécessaire de sélectionner un substitut aussi proche que possible, sur des critères parfois davantage liés à la nature des impacts de sa fabrication que pour la proximité de sa formule chimique.

Tableau 28 : Liste des substituts utilisés pour l'étude d'impact

Produit	Substitut
Alamine 336 (mélange de trioctyl- et tridécylamine utilisé dans les usines de traitement du minerai)	Triéthylamine
Fritte de verre	Tube de verre borosilicaté
KF, 2HF	KCl et HF utilisés dans les mêmes proportions molaires
Stéarate de zinc	Acide stéarique
TBP (tributylphosphate)	Triphénylphosphate
Zircaloy	Calcul CEA par analogie avec le chrome

Le zirconium ne figure pas dans la base Ecoinvent, mais [Ashley 2015] signale que son procédé de fabrication est voisin de celui du chrome (procédé Kroll). Une analogie peut être effectuée avec le titane, qui est également purifié par magnésiothermie de son chlorure, comme le zirconium. A partir de l'énergie nécessaire pour produire 1 t de Zr métal, nous avons estimé celle d'1 t de zircaloy d'usage nucléaire en considérant arbitrairement que le zircaloy nécessite 2 fois plus d'énergie que le zirconium métal (il nécessite 3 étapes industrielles supplémentaires : séparation Zr/Hf à Jarrie, obtention de l'alliage avec

l'étain et mise en forme des gaines et grilles, ainsi que de nombreux transports entre les 5 usines), et en ajustant les rejets de CO₂ avec ceux de la fabrication du chrome ; on obtient alors un facteur 1,6 pour le zircaloy par rapport au chrome. Le facteur multiplicatif ainsi obtenu est alors repris à l'identique pour toutes les catégories d'impact liés à la fabrication du zircaloy.

Tableau 29 : Estimation de l'impact de la fabrication du zircaloy

Energie nominale pour produire Zr métal (GWh/t)	0,447
Energie nominale estimée pour produire le zircaloy déhafnié (GWh/t)	0,894
Rejet de CO ₂ du mix français 2016 (t/GWh)	45,4
Rejet de CO ₂ eq pour produire le zircaloy (t/t Zr)	40,6
Rapport rejet de CO ₂ Zr nucléaire/Cr	1,6

La liste de toutes les fiches Ecoinvent prises en compte est récapitulée en Annexe 4.

Une mention particulière doit être faite pour les carburants. En effet, il est nécessaire de prendre en compte leur combustion, dont la contribution est difficile à estimer car elle impacte dans de nombreuses catégories (pas seulement par les rejets de CO₂, SO₂ et NOx).

La méthodologie utilisée consiste à rechercher les fiches Ecoinvent correspondant à la combustion (« burned » en anglais américain), dans lesquelles est présent l'inventaire complet de la production (distillation du pétrole brut), des transports (liés au marché des approvisionnements) et la combustion. On peut le vérifier en analysant le détail de l'inventaire de chaque fiche.

Il s'agit ensuite d'extraire la partie hors combustion, soit production + transports. On réalise une analyse pour les différents éléments intervenant dans l'inventaire, avec la quantité indiquée (ex : pour le diesel, pour 0,0234 kg de carburant pour l'obtention finale de 1 MJ de diesel, unité imposée par Ecoinvent).

On exporte les résultats vers Excel et on convertit les catégories d'impact de l'opération précédente dans l'unité voulue (souvent passage de MJ à MWh).

Le rapport des impacts entre production + transports et la totalité, permet pour chaque catégorie, de déterminer la proportion de la production + transports, donc par différence la part de la seule combustion (cf. tableau en fin d'Annexe 4).

4.2.3 Concentration des réactifs

Les fiches Ecoinvent des produits, bien que comportant un descriptif des hypothèses utilisées (pays de production, état de la technologie retenue, marché,...) ne sont pas toujours explicites pour les concentrations retenues, lorsque plusieurs existent sur le marché. Ce point n'est quasiment jamais mentionné dans les articles d'ACV et dans certains cas, on ne trouve pas davantage d'indication dans la référence primaire qui a servi de base pour l'inventaire du produit considéré.

Dans le cas présent, trois réactifs ont dû faire l'objet d'hypothèses pour leurs fiches Ecoinvent. Pour les acides, on a considéré que les fiches Ecoinvent se rapportaient à la concentration de leur azéotrope ; pour l'hydrazine de la Hague, on a supposé qu'il s'agissait du produit pur puisqu'il est soluble en toutes proportions dans l'eau. Les résultats des hypothèses sont résumés dans le Tableau 30.

A noter que pour l'usine TU5, l'acide nitrique produit par distillation des eaux-mères de précipitation à l'eau oxygénée est à la concentration de l'azéotrope (68 %m), ne nécessitant pas de correction.

Tableau 30 : Concentrations ajustées pour l'impact de quelques réactifs

Réactif	Inventaire dans les usines	Concentration supposée dans Ecoinvent	Valeur considérée pour NELCAS
HNO ₃	Malvési : 13971 t à 63 %m	68 %m	12944 t
	La Hague : 4073 t à 60 %m		3594 t
HF (produit)	Romans : 830 t à 35 %m	36 %m	830 t
	W : 7246 t à 70 %m		14492 t
Hydrazine	La Hague : 111 t à 35 %	pure	38,85 t

4.2.4 Impacts évités

Trois usines du cycle produisent des réactifs qui sont vendus sur le marché :

- Romans et W qui produisent de l'HF, réutilisé dans l'industrie chimique,
- L'usine TU5, qui produit de l'acide nitrique intégralement recyclé à La Hague.

Dans ces trois cas, il s'agit d'impacts évités, selon le terme consacré en ACV, c'est-à-dire que les impacts de la fabrication de ces réactifs sont comptés négativement (dans l'outil NELCAS) pour les usines concernées du cycle puisque les utilisateurs en aval épargnent la consommation de ressources naturelles et les nuisances associées que leur production engendrerait. Il est ainsi possible qu'une installation ait un impact négatif dans certaines catégories si l'impact évité par le recyclage est plus important que les ressources consommées ; c'est le cas de l'usine W à Pierrelatte, qui reste toutefois exceptionnel.

4.3 Impact des rejets radioactifs

Les spectres complets des rejets de chaque usine ont été considérés. La méthodologie développée, qui s'applique aux rejets gazeux et liquides, est la suivante :

- Pour chaque usine, on associe à chaque radionucléide (RN) la valeur du facteur de caractérisation (FC) de la méthode IMPACT2002+ ou un équivalent converti d'une autre méthode (souvent ILCD) ;
- On calcule la contribution à la catégorie « Ionizing radiation (BqC14 eq) » selon IMPACT2002+ par RN et pour l'usine considérée ;
- On détermine le taux d'activité obtenu avec cette valeur par rapport à la somme des activités de tous les RN du spectre ;
- On corrige l'impact obtenu avec les FC disponibles du taux obtenu précédemment, ce qui revient à supposer que les RN sans FC auraient une valeur de FC voisine de celles des autres RN ;
- On intègre cette valeur « Ionizing radiation » du spectre de chaque usine, pour les rejets liquides et gazeux, dans le logiciel NELCAS avec le nouvel indicateur « Ind_rejet_rad » dans les données de sortie.

Les activités des rejets radioactifs de toutes les usines, ainsi que les détails des calculs d'impact radiologique avec la méthode IMPACT2002+, sont rassemblés en Annexe 5.

Quelques précisions sont nécessaires pour expliciter certaines hypothèses.

En l'absence de données quantifiées pour l'usine Katco de Tortkuduk (Kazakhstan), les valeurs ont été estimées à partir des rejets de poussières des deux usines nigériennes (cf. Tableau 31).

On considère que les 20,2 t/an de poussières de Cominak sont dues quasi exclusivement à l'usine, car On considère que les 20,2 t/an de poussières de Cominak sont dues quasi exclusivement à l'usine, et que les poussières générées au niveau de l'exploitation de la mine souterraine demeurent en sous-sol. Au sein de l'usine Cominak, on considère que x % des poussières sont dues à l'imprégnation du minerai broyé et (100-x) % au séchage-calcination, car ce sont les deux principales étapes émettrices de poussières. En l'absence d'information précise, on considèrera que x = 50%. L'usine Katco ne possédant pas d'attaque (les solutions chargées sont pompées des puits de production), on estime alors la quantité de poussières rejetées à : $0,0126 \cdot 0,5 \cdot 4007 = 25,2$ t/an. Le spectre en U des poussières étant le même que celui du Niger (chaînes naturelles de l'U238 et U235 supposées à l'équilibre séculaire), l'activité totale rejetée par Katco est alors de : $3,23E+10$ Bq/an (32300 MBq), soit 25 % de plus que celle de Cominak.

Tableau 31 : Estimation des poussières rejetées par l'usine Katco

	Production 2015 (tU/an)	Particules (t/an)	Rapport (t poussières/tU)
Somaïr	2509	141,4	0,0564
Cominak	1607	20,2	0,0126
Katco	4007	25,2	0,0063

Pour ce qui concerne le CIRES qui reçoit les déchets TFA, par souci de simplification et à défaut de disposer d'une caractérisation précise, le même spectre radiologique que pour le CSA est appliqué aux résultats des mesures des activités alpha et bêta globales. Même si cette approche est scientifiquement inexacte, cette approche est estimée acceptable en raison du niveau des rejets radioactifs du CIRES, difficilement mesurables.

4.4 Indicateurs de rejets chimiques

Un certain nombre d'indicateurs de rejets sont exprimés par les laboratoires de mesure des exploitants avec des intitulés réglementaires que l'on ne retrouve pas dans les bases de données utilisées pour l'ACV.

Il est donc nécessaire de les traduire en équivalents qui pourront être pris en compte dans l'étude. Les différentes grandeurs et leurs équivalents proposés sont précisés dans le tableau suivant :

Tableau 32 : Intitulés analytiques et leurs équivalents pour cette étude

Indicateur de rejet	Equivalent
AOX	Cl contenu dans le chloroforme
COV	dodécane
DCO	1,5-cyclooctadiène

Le paramètre AOX (« Adsorbable organic halogen ») est une mesure de la qualité de l'eau. La valeur est une concentration des atomes de chlore en mg/L, correspondant à la quantité d'halogènes (chlore, brome, iode, mais pas fluor) contenus dans les substances organiques adsorbables sur du charbon actif (norme ISO 9562). Cette valeur est purement qualitative, car elle ne permet pas de séparer les composés dangereux de ceux qui ne le sont pas. Toutefois, les composés halogénés

organiques sont généralement classés parmi les substances très toxiques. Seuls les sites EDF utilisent cet indicateur (cf. Annexe 1).

Les composés organiques volatils, ou COV sont des composés organiques pouvant facilement se trouver sous forme gazeuse dans l'atmosphère. Ils constituent une famille de produits très large. Leur volatilité leur confère l'aptitude de se propager plus ou moins loin de leur lieu d'émission, entraînant ainsi des impacts directs et indirects sur les animaux et la nature. Il est délicat de choisir un équivalent, qui dépend du spectre considéré. Les usines du cycle qui déclarent des COV sont les usines de traitement du minerai d'uranium qui recourent à l'extraction par solvant, technique souvent génératrice de COV (Somaïr et Cominak, avec plusieurs centaines de tonnes par an) et Socatri (189 kg en 2016, issus essentiellement de dégraissant). Compte tenu de la contribution prépondérante des deux mines nigériennes, on considèrera que les COV sont essentiellement constitués du solvant utilisé, de composition : 5 % vol. d'Alamine 336 (0,1 M à Somaïr), 2 % de tridécanol et 93 % de diluant aliphatique (Keroil™), et l'on assimilera l'ensemble à du dodécane.

La demande chimique en oxygène (DCO) figure dans les déclarations de rejet des usines de conversion de Pierrelatte, de Socatri et de La Hague (cf. Annexe 1). Elle représente la consommation en dioxygène par les oxydants chimiques forts pour oxyder les substances organiques et minérales de l'eau, permettant d'évaluer la charge polluante des eaux usées. La DCO est une des mesures principales des effluents pour les normes de rejet, qui est beaucoup utilisée en France. Il semble compliqué d'identifier un substitut représentatif des différentes natures de matières oxydables dans les effluents. Toutefois, la méthode de calcul d'impact IMPACT2002+ donne un facteur de caractérisation de 0,022 kg eq PO₄/kg dans la catégorie « eutrophisation aquatique » (le n° CAS indiqué correspond au 1,5-cyclooctadiène), qui sera utilisé dans l'étude.

4.5 Description du logiciel

Le logiciel NELCAS a été développé au CEA Marcoule afin de disposer d'un outil spécifique destiné à déterminer le bilan environnemental de différents cycles électronucléaires, actuels ou futurs, avec autant d'options que nécessaire (actuel, fermé avec mono- ou multi-recyclage du Pu, prise en compte ou non du recyclage de l'URT, transition énergétique avec une montée en puissance variable dans le temps de réacteurs de 3ème puis 4ème génération). Une première version dite « NELCAS 1 » a d'abord été élaborée sous Excel dans la période 2010-2014, puis une version 2 a ensuite été développée en langage C++ à partir de 2015 avec un objectif de plus grande convivialité pour l'utilisateur ; elle est actuellement opérationnelle.

Le principe de l'outil consiste à définir un cycle avec ses usines et leurs flux de matière, à déterminer les hypothèses associées (telles que le mix minier, le mode de gestion des cœurs des réacteurs, le taux d'enrichissement et d'appauvrissement, la durée de vie des installations, les modes de gestion des déchets et leurs exutoires,...), puis à intégrer les intrants et extrants de toutes les usines, incluant les phases de construction, fonctionnement et démantèlement, sans oublier les transports, a minima durant le fonctionnement des usines. Pour une ACV complète, les matériaux et l'énergie nécessaire sont à prendre en compte, aussi bien lors de la construction que pendant le fonctionnement des usines et la déconstruction.

Il est possible de créer autant d'usines ou d'installations que nécessaire, selon le degré de finesse souhaité.

La base de données comporte les facteurs de caractérisation correspondant aux différentes catégories d'impact selon la méthode choisie. Des catégories supplémentaires peuvent être ajoutées, comme par exemple dans le cas présent les volumes des différents types de déchets, conventionnels et radioactifs.

Il est alors possible, pour chaque scénario de cycle choisi, de lancer les calculs d'impact, soit par usine soit pour l'ensemble du cycle. Les résultats bruts sont ensuite exportables vers Excel, afin d'être mis en forme : regroupement des impacts des différents groupes d'usines (mines, conversion, enrichissement, fabrication de combustible, réacteurs, retraitement/recyclage, entreposages/stockages) et réalisation de graphes explicites, comparaison des impacts de différents scénarios.

5 RESULTATS DES CALCULS D'INDICATEUR D'IMPACT ACV ET INTERPRETATION

5.1 Transports

Comme expliqué au § 3.8.1, les transports ont été détaillés pour chacune des étapes, concernant les matières nucléaires d'une usine à l'autre et les déchets nucléaires de chaque usine vers le centre de stockage approprié.

Les calculs ont été réalisés pour les quantités théoriques de matière pour alimenter le cycle (8494 t Unat pour l'ensemble des mines dans le cas du cycle actuel, 9469 t Unat en entrée d'un cycle ouvert). Les résultats des transports sont présentés dans le

Tableau 33. Avec nos choix d'affectation des transports aux différentes étapes du cycle (cf. § 3.8), les mines et le stockage, situés en extrémité du cycle, n'ont pas d'impact pour cette composante.

Dans les hypothèses de cette étude ACV, on considère que l'on ne retraite pas les combustibles MOX usés. Ils nécessitent alors un transport du lieu de désactivation vers Cigéo. De la même façon, les UOX usés en cycle ouvert sont évacués du lieu de désactivation centralisé (supposé dans cette étude au centre de la France) vers Cigéo.

Tableau 33 : Rejets dus aux transports pour le cycle actuel (t/an)

Etape	CO ₂	SO ₂	NO _x	CO ₂ étape i/ total (%)
Conversion	4254	9,0	35	56
Enrichissement	104	0,001	0,04	1,4
Fabrication UOX	213	0,001	0,09	2,8
Réacteurs	2241	0,01	1,09	29
Traitement/recyclage	821	0,02	1,86	11
Entreposage MOX usé	7,7	0,001	0,13	0,1
Total	7640	9,0	38	100

L'impact principal est dû aux rejets de CO₂ entre les mines et l'usine de conversion. L'affectation à une seule étape, nécessaire pour présenter des résultats séparés par étape du cycle (cf. § 4.5), ne doit pas faire oublier qu'en réalité, c'est l'ensemble mines-conversion et l'éloignement des sites associés qui sont responsables de cette composante. Le second contributeur est représenté par les réacteurs, avec les convois de colis de déchets vers les trois sites Andra.

Si l'on exprime les rejets de CO₂ par rapport à la production électrique du parc français en 2015 (419 TWh), on obtient une valeur de 0,0182 g/kWh pour le cycle actuel, soit une part négligeable de l'impact total du cycle : entre 0,15 % si l'on retient comme valeur de rejets de CO₂ de l'électricité nucléaire française 12,35 g/kWh [Ecoinvent 3.1] et 0,46 % si l'on prend la valeur d'environ 4 g CO₂/kWh de notre modélisation (cf. § 5.3).

Pour le cycle ouvert, les résultats sont récapitulés dans le Tableau 34.

Tableau 34 : Rejets dus aux transports pour le cycle ouvert (t/an)

Etape	CO ₂	SO ₂	NO _x	CO ₂ étape i/ total (%)
Conversion	4564	8,0	36,2	64
Enrichissement	111	0,001	0,05	1,6
Fabrication UOX	237	0,001	0,10	3,3
Réacteurs	2209	0,01	1,27	31
Entreposage UOX usés	17,9	0,003	0,31	0,3
Total	7140	8,0	37,9	100

On constate que les réacteurs ne se voient pas attribuer exactement le même impact lié au transport dans les deux scénarios : une partie des combustibles neufs transportés vers les centrales est constituée de combustibles MOX dans le cycle actuel, qui viennent de Marcoule, plus excentré que Romans, d'où proviennent les combustibles UOX. Il y aurait en revanche un peu moins de déchets à transporter. Le transport ultérieur des combustibles désactivés vers Cigéo est imputé aux centres d'entreposage.

Les résultats obtenus permettent de comparer les deux scénarios.

Tableau 35 : Comparaison des rejets liés aux transports des deux scénarios

Polluant	CO ₂	SO ₂	NO _x
Cycle ouvert/actuel	0,93	0,88	1,00

La comparaison est légèrement en faveur du cycle ouvert, essentiellement pour les rejets de SO₂ (-12%).

5.2 Surfaces des entreposages

Les surfaces d'entreposage ont été déterminées pour les deux scénarios compte tenu des flux correspondants ; les résultats sont rassemblés dans le Tableau 36.

Les entreposages de l'URT et de l'U appauvri sont pris en compte.

Tableau 36 : Surfaces d'entreposages pour les deux scénarios (m²/an)

Type d'entreposage	Cycle actuel	Cycle ouvert
CU UOX		441
CU MOX	48	
CSD-V	180	
CSD-C	82	
U appauvri	2034	2266
URT	2464	
Total	4808	2707

Pour ce qui concerne le seul paramètre de la surface au sol occupée par les entreposages, la comparaison des deux scénarios montre une différence en faveur du cycle ouvert (moins d'espace consommé). Cette différence est due au choix de ne pas compacter l'URT : en cas de compactage de l'URT et d'entreposage dans des conditions similaires à celles de l'uranium appauvri, la surface occupée serait de l'ordre de 275 m²/an pour l'URT, soit 2620 m² au total.

Au bilan, la catégorie d'impact « *surface occupée* » des entreposages met en évidence l'impact du non compactage de l'URT (impact accentué ici par le fait de ne pas considérer son recyclage).

5.3 Résultats pour les deux scénarios

Deux scénarios sont à étudier dans le cadre de l'article 9. L'étude de sensibilité s'est jusqu'à présent limitée à la seule prise en compte ou non de rejets liquides potentiels des mines MCO et MS. Pour la mine ISL, on retient dans tous les cas que 10% de l'acide sulfurique introduit reste dans le sous-sol. Il y a donc 4 cas à étudier (2 scénarios, avec ou sans rejets liquides potentiels).

Pour chaque cas, on présente les résultats sous la forme d'un histogramme regroupant les indicateurs spécifiques de la méthode IMPACT2002+, et d'un second histogramme regroupant les indicateurs spécifiques à cette étude (eau, déchets, surface).

Les résultats détaillés de l'ensemble des calculs sont reportés en Annexe 7.

5.3.1 Cycle actuel

5.3.1.1 Catégories IMPACT2002+

Les contributions relatives des différentes étapes du cycle pour les 9 catégories d'impact retenues sont présentées sur les Figure 1 et Figure 2.

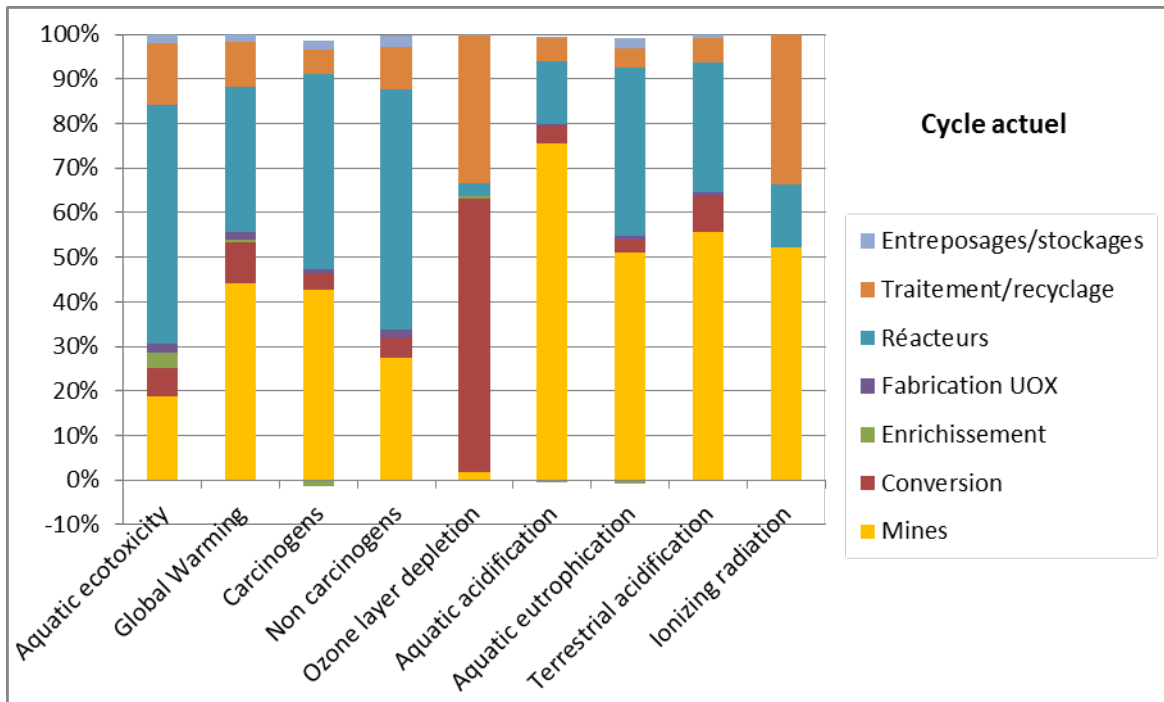


Figure 1 : Impacts du cycle actuel sans rejets liquides des mines

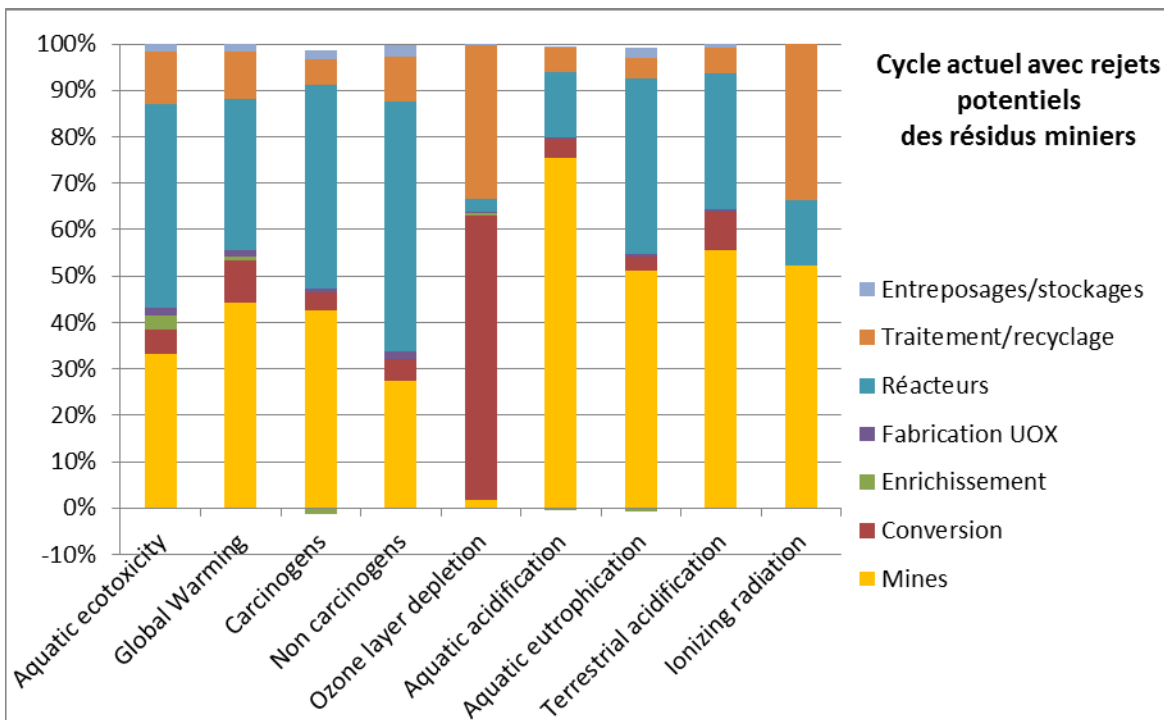


Figure 2 : Impacts du cycle actuel avec rejets liquides potentiels des résidus miniers

Dans les deux cas, ce sont les étapes mines et les réacteurs qui présentent les plus fortes contributions dans la majorité des 9 catégories, y compris l'indicateur « ionizing radiation », sauf pour « Ozone Layer Depletion ». Lorsque l'on prend en compte les rejets potentiels des mines MCO et MS, l'impact « aquatic ecotoxicity » des mines passe de 19 à 33 % du total de cette catégorie, la part des réacteurs passant alors de 54 à 44 %.

On constate par ailleurs que les étapes de conversion et de traitement/recyclage représentent une part prépondérante de la catégorie « ozone layer depletion » : cela est dû aux rejets de N₂O des usines de Malvési (221 t/an) et de La Hague.

L'impact de la nouvelle usine d'enrichissement GBII étant beaucoup plus faible que l'ancienne usine Eurodif (60 fois moins d'énergie consommée à capacité équivalente), la contribution de l'enrichissement devient très faible dans la plupart des catégories d'impact. On observe même un impact très légèrement négatif de l'étape d'enrichissement dans 5 catégories sur 9, dont la plus marquée est « carcinogènes » (barres en vert sur la Figure 1). Deux catégories ne sont pas visibles sur le graphe (« non carcinogènes » : - 0,16 % et « aquatic acidification » : - 0,45 %) et une est quasiment neutre (« terrestrial acidification » : - 0,03 %). Cela s'explique par l'importante production d'HF de l'usine W (7246 t HF 70 %/an), à laquelle on attribue un crédit environnemental puisque l'HF produit est vendu sur le marché, épargnant un impact environnemental à d'autres utilisateurs (principe du recyclage).

5.3.1.2 Autres catégories

Elles ne sont pas affectées par la prise en compte ou non des rejets liquides des mines ; il n'y a donc qu'un seul graphe.

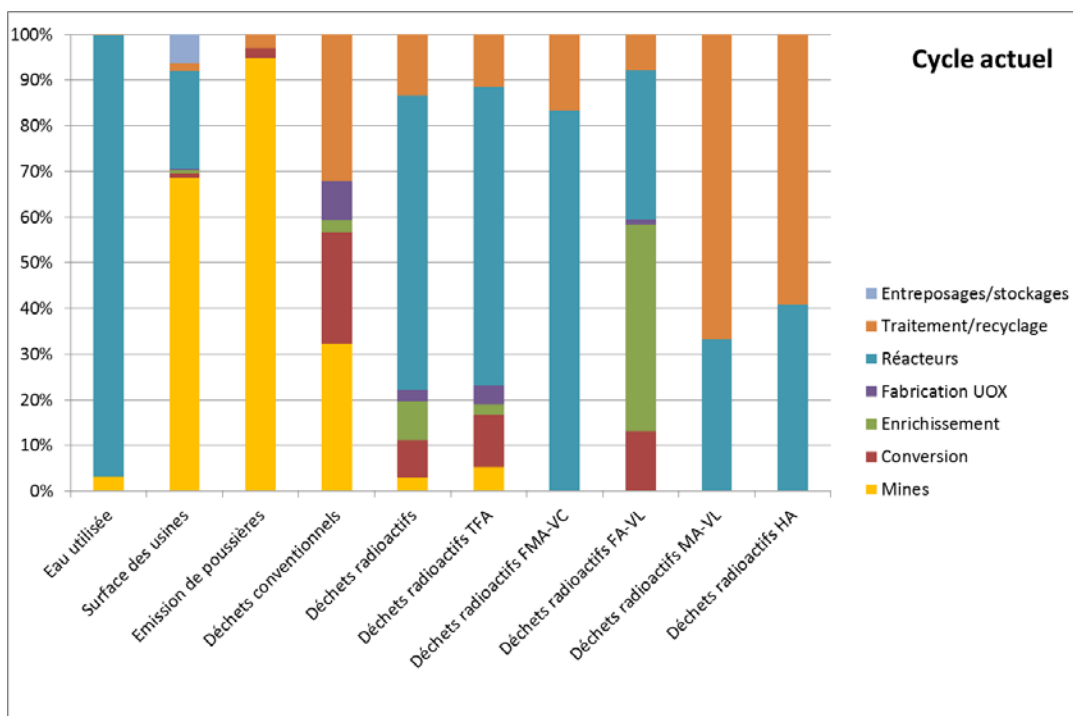


Figure 3 : Autres catégories d'impacts du cycle actuel

On constate que l'eau nécessaire pour l'ensemble du cycle est essentiellement prélevée pour le refroidissement des réacteurs. L'occupation du sol (surface des usines) et l'émission de poussières sont dues essentiellement à l'activité minière.

Notons que les déchets miniers sont comptabilisés à part mais ne présentent pas d'intérêt d'être représentés sur cette figure (100% venant des mines, par définition). Dans l'inventaire, la mine Katco comptabilise des déchets de catégorie TFA qu'elle doit gérer, puisqu'une mine ISL ne génère pas de résidus de traitement du minéral.

Les déchets FA-VL de la conversion sont dus exclusivement aux futurs déchets de reprise des lagunes de Malvési.

Pour les déchets radioactifs, les proportions par étape du cycle sont à compléter par la représentation des quantités totales relatives des différents types (cf. § 5.3.4).

5.3.2 Cycle ouvert

5.3.2.1 Catégories IMPACT2002+

Les contributions relatives des différentes étapes du cycle pour les 9 catégories d'impact retenues sont présentées sur les Figures 4 et 5.

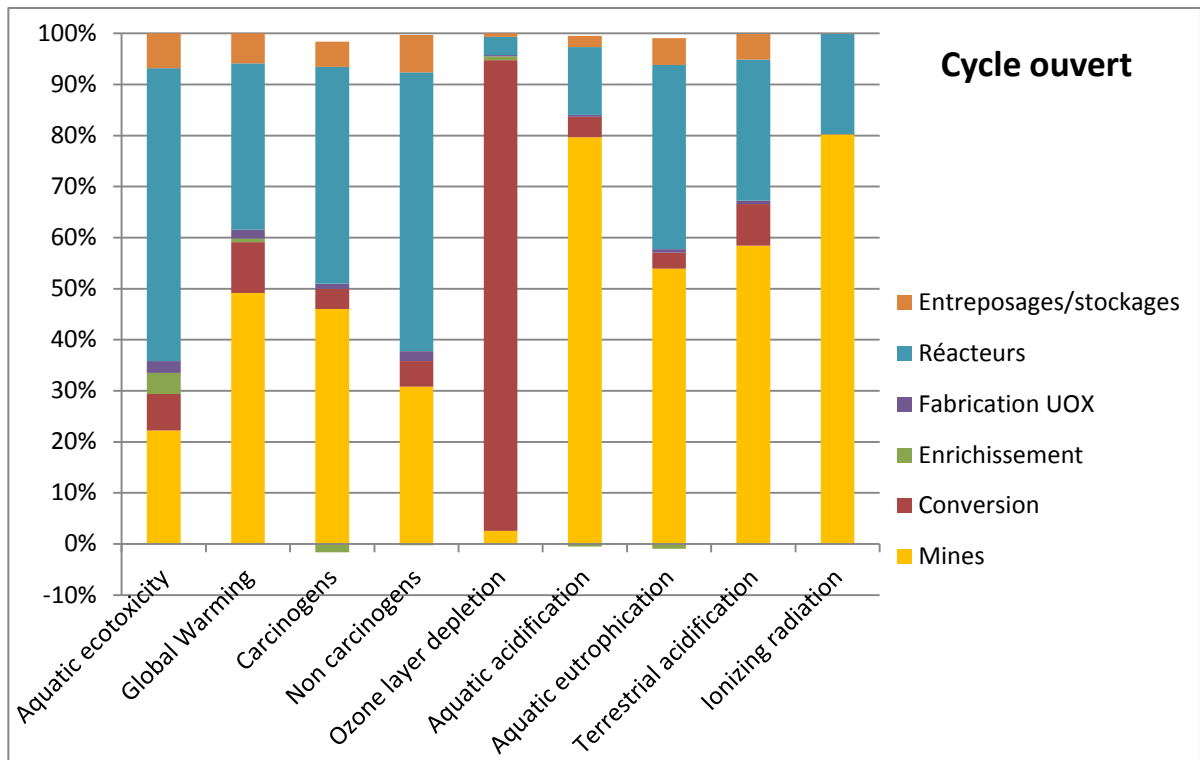


Figure 4 : Impacts du cycle ouvert sans rejets liquides des mines

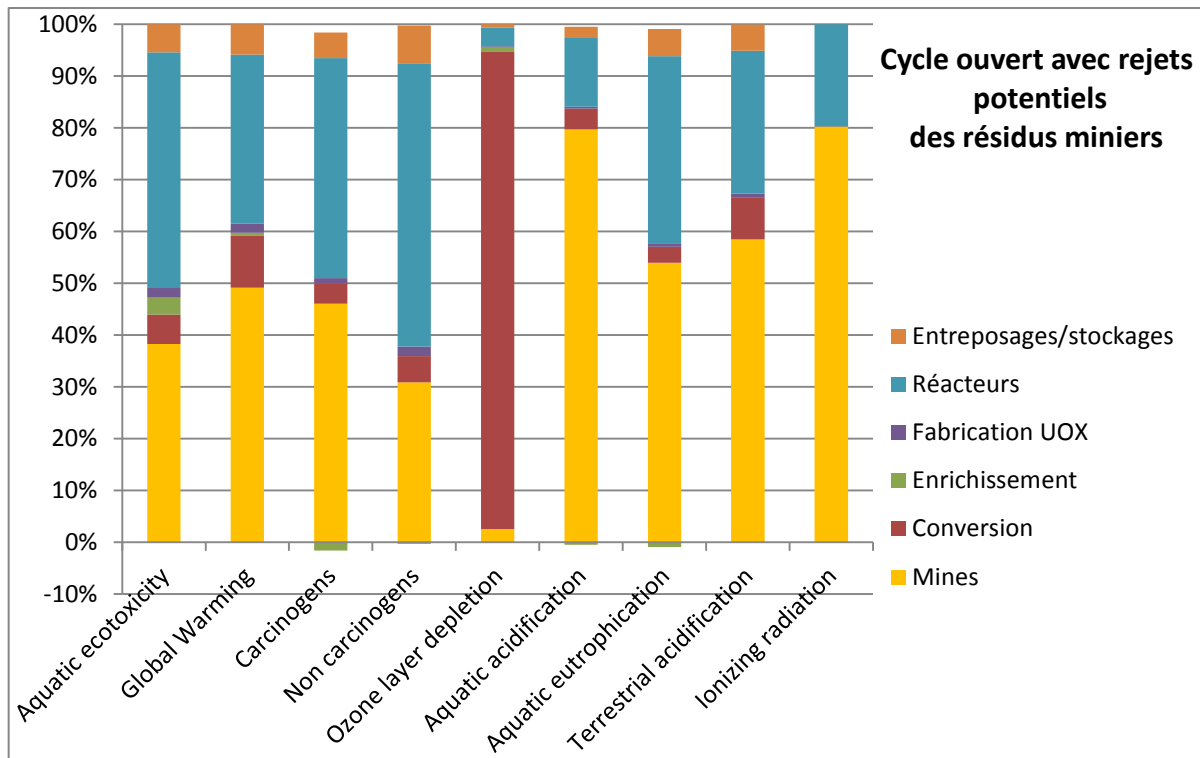


Figure 5 : Impacts du cycle ouvert avec rejets liquides potentiels des mines

De la même manière que précédemment, on retrouve la contribution négative de l'enrichissement à plusieurs catégories d'impact en raison de la production d'HF de l'usine W qui est valorisée.

Comme pour le cycle actuel, la prise en compte des rejets liquides potentiels des mines augmente leur contribution à la catégorie « aquatic ecotoxicity ». La catégorie « ionizing radiation » est due essentiellement aux mines et la contribution des réacteurs passe à 20 % en cycle ouvert, contre 14 % pour le cycle actuel.

On remarque la contribution presque exclusive de la conversion à la catégorie « ozone layer depletion », compte tenu de l'inventaire disponible. En effet, l'autre contributeur dans le cycle actuel est le retraitement, qui n'apparaît pas dans le scénario du cycle ouvert.

5.3.2.2 Autres catégories

De même que pour le cycle actuel, les catégories eau utilisée, occupation du sol (surface des usines), les poussières et volume des déchets sont présentées en relatif sur la Figure 6.

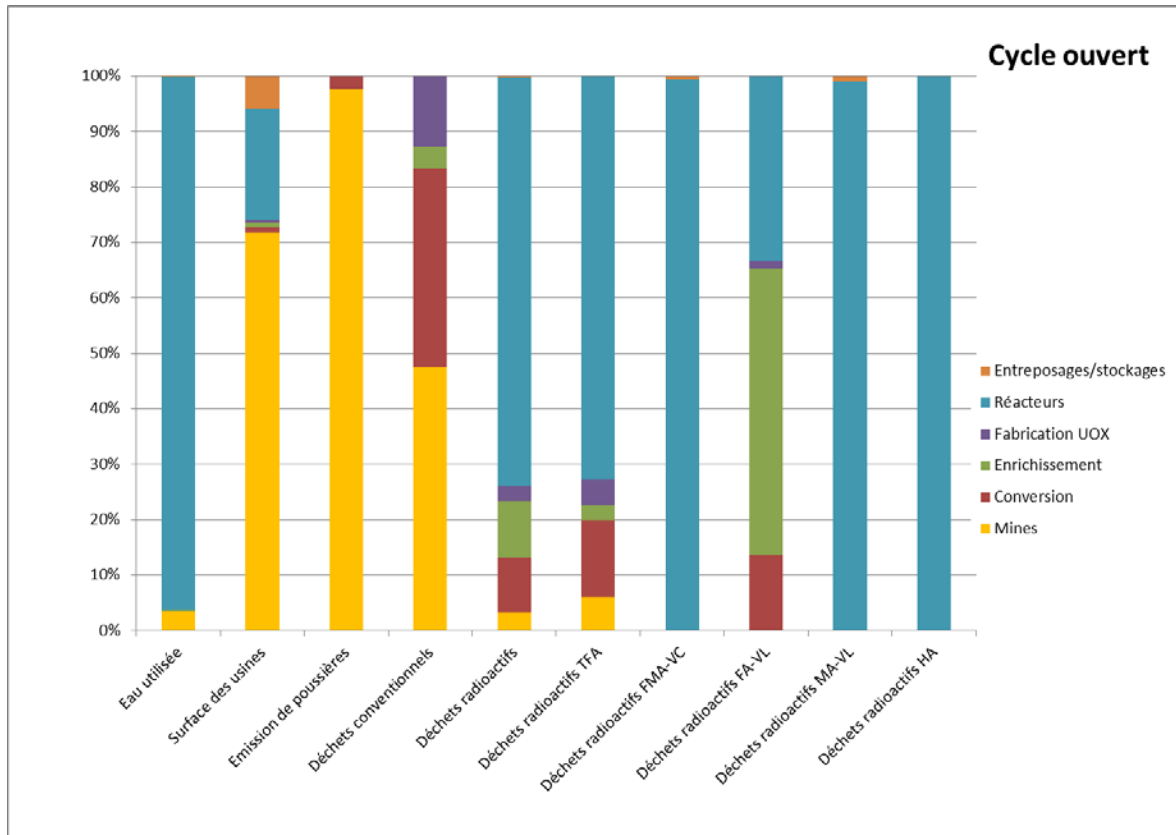


Figure 6 : Autres impacts du cycle ouvert

5.3.3 Contribution des différentes phases du cycle de vie des usines

L'outil NELCAS permet de distinguer quatre phases pour une usine : la construction, le fonctionnement, les transports et la déconstruction (« démantèlement » dans le langage nucléaire). Il est intéressant de connaître quelles phases sont potentiellement les plus impactantes dans les différentes catégories, à la fois pour la compréhension de la cause et pour pouvoir apprécier ultérieurement les composantes des incertitudes.

Il a été convenu de regrouper les opérations de construction et démantèlement d'une part, de fonctionnement et des transports d'autre part, sachant que le détail est conservé en cas de besoin.

Quelques graphes sont présentés pour quatre catégories d'impact dans le cas du cycle actuel (cf. Figures 7 à 10).

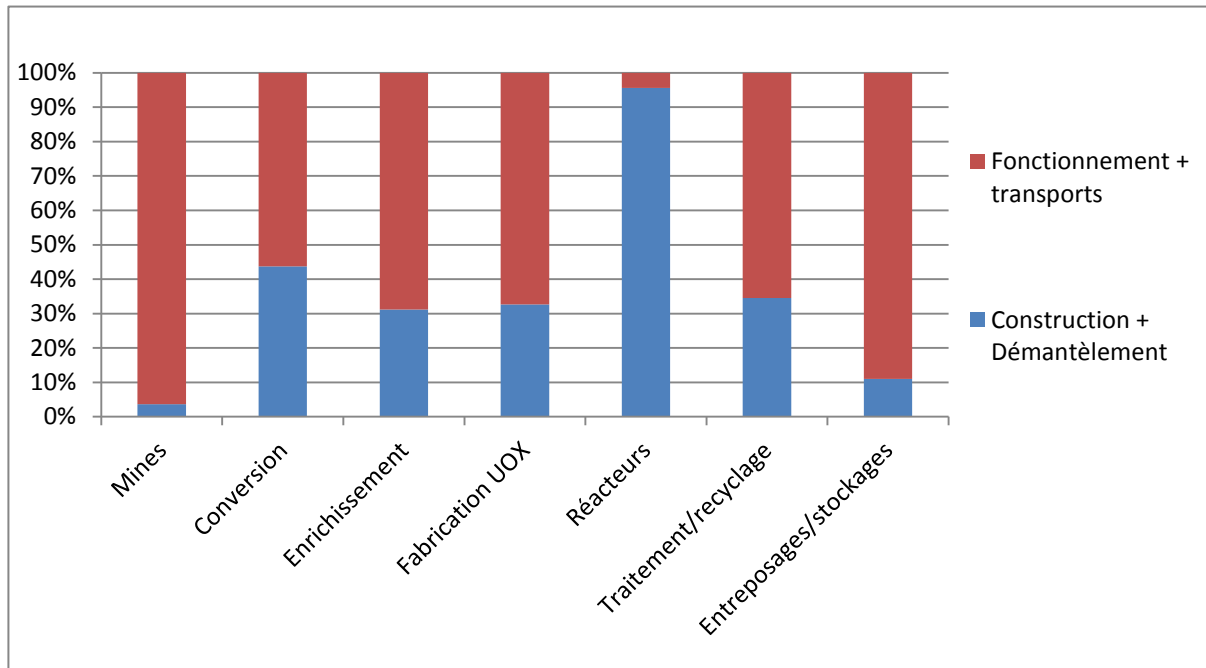


Figure 7 : Impact "aquatic ecotoxicity" pour le cycle actuel

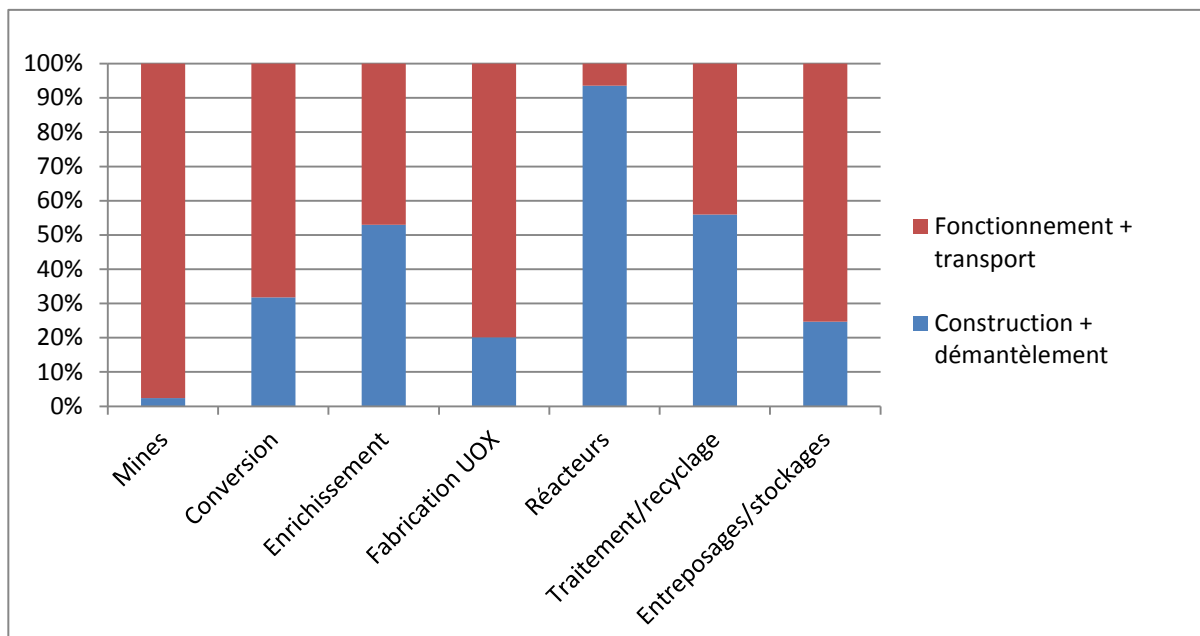


Figure 8 : Impact "carcinogens" pour le cycle actuel

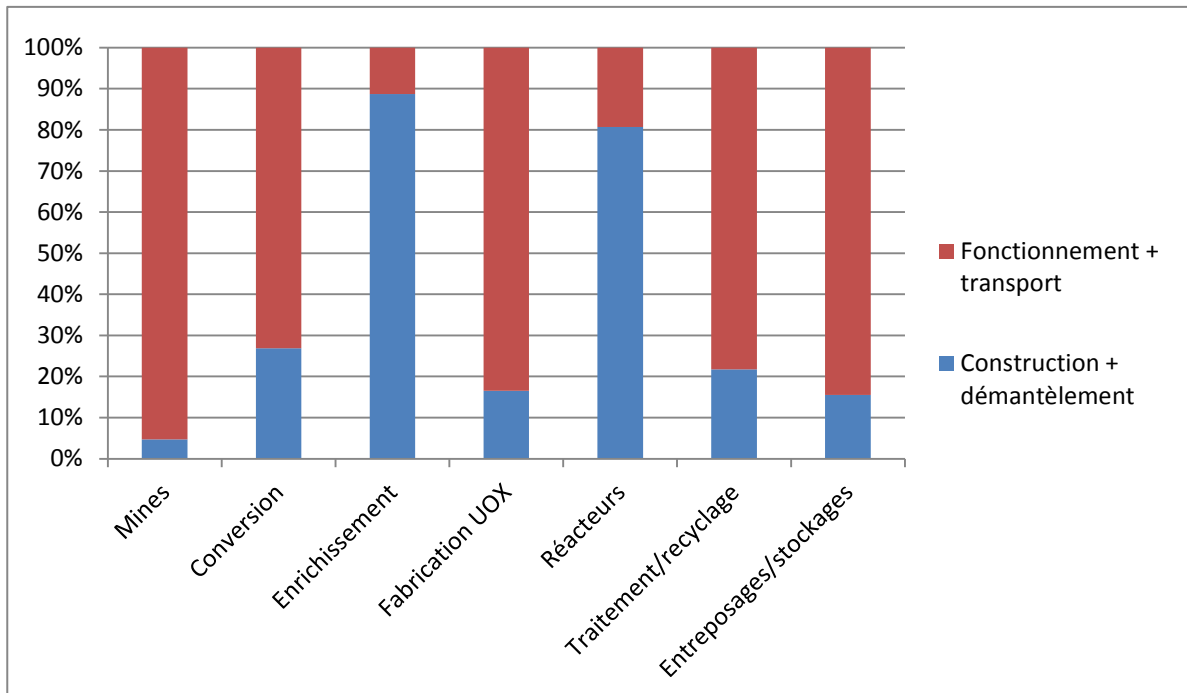


Figure 9 : Impact "global warming" pour le cycle actuel

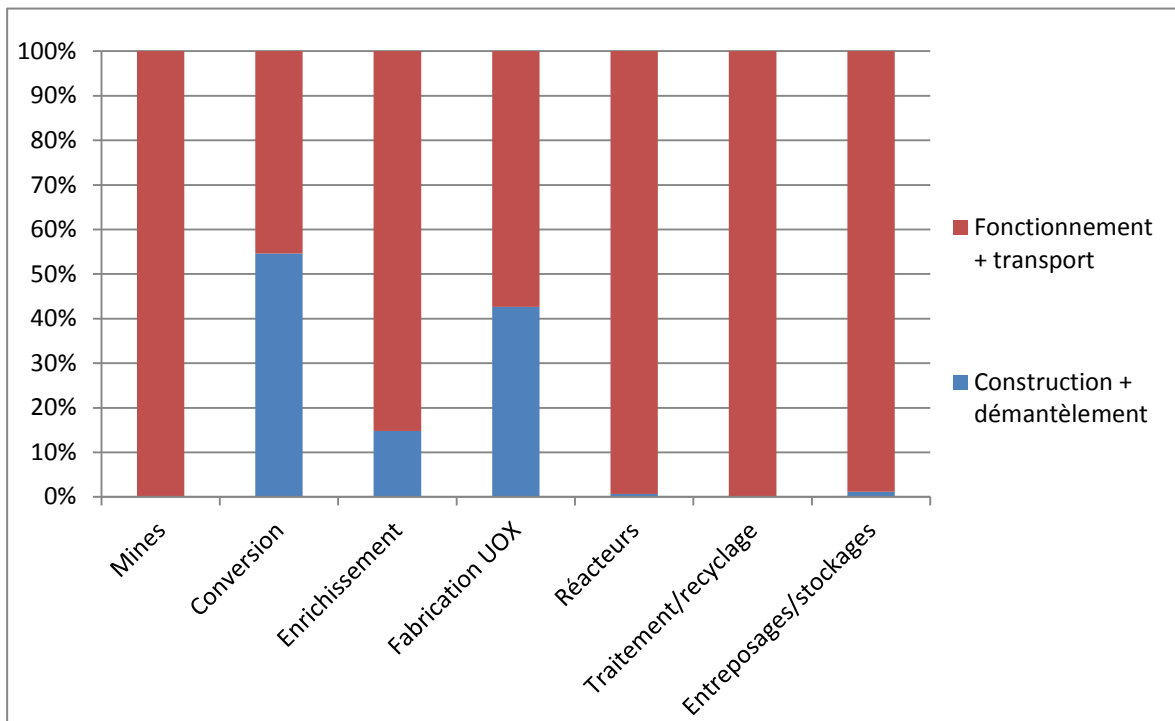


Figure 10 : Impact "ionizing radiation" pour le cycle actuel

Le fonctionnement des mines, des réacteurs et de l'aval du cycle représentent plus de 99% des contributions à l'impact radiologique, selon l'indicateur « ionizing radiation ».

On constate que la part de la construction et du démantèlement dans l'impact total est très variable selon les catégories analysées, avec parfois une contribution très importante : c'est le cas en particulier des réacteurs pour les trois premières catégories choisies, en raison des quantités de matériaux et d'énergie qu'il a fallu pour construire les 58 unités françaises.

A l'inverse, le fonctionnement des mines, des réacteurs et de l'aval du cycle représentent plus de 99 % de leur contribution à l'indicateur « ionizing radiation », ce qui signifie que, d'après nos hypothèses, la construction et le démantèlement ont proportionnellement un impact beaucoup plus faible (les déchets du démantèlement, correctement conditionnés, n'ont pas d'impact radiologique notable).

5.3.4 Effet de serre du cycle électronucléaire

Les valeurs obtenues concernant la catégorie « global warming » de la méthode IMPACT2002+ sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 37 : Contribution du cycle électronucléaire à l'effet de serre

		Cycle actuel	Cycle ouvert
Global Warming	gCO ₂ /kWh	3,72	3,71

On obtient une valeur légèrement inférieure à 4 g CO₂/kWh, moins élevée que d'autres déterminations de la littérature (Tableau 38). Cela peut paraître surprenant compte tenu du niveau de détail pris en compte, concernant à la fois les intrants (réactifs et carburants, matériaux et énergie de construction/démantèlement), les extrants (rejets radioactifs et chimiques) et la recherche de valeurs manquantes pour certaines données afin de ne pas minimiser les impacts.

Tableau 38 : Différentes valeurs d'effet de serre de l'énergie nucléaire (gCO₂/kWh)

Auteur	Weisser 2007	Lenzen 2008	Sovacool 2008	Turconi 2013	Warner 2012	Poinsot 2014
Type d'étude	Guide	Etude paramétrique des REP	Revue critique	Revue	Revue des émissions des REP	Modélisation du cycle français de 2010 (avec diffusion gazeuse)
Nombre d'études analysées	15		103 dont seulement 20 comportent une méthodologie explicite	10	99	
Valeurs mini et maxi (moyenne)	3-30 (10)	10-130 (65)	1,4 – 288 (66)	3,1 - 35	3,1 – 220 (30)	5,29

Plusieurs auteurs justifient les variations considérables par les très nombreux facteurs intervenant dans cette détermination, dont les principaux semblent être la teneur en uranium du minerai et la méthode d'exploitation associée, le mix énergétique, la technique d'enrichissement et le taux de charge des réacteurs [Warner 2012] ; la méthode d'ACV retenue est également citée mais son importance n'est quasiment pas étudiée dans les articles qui la mentionnent. Faire une moyenne de valeurs obtenues à partir d'hypothèses très différentes ne paraît pas justifié, il est plus intéressant de comprendre ce qui dans les hypothèses mène à des résultats contrastés.

Il convient de noter également la valeur de 12,35 g/kWh retenue par Dones pour l'électricité nucléaire française [Ecoinvent 3.1], valeur généralement utilisée par la communauté.

Les valeurs obtenues dans la présente étude (~ 4 g CO₂/kWh) peuvent s'expliquer, dans le cadre du cycle français et d'une électricité à 70 % d'origine nucléaire donc décarbonée (sauf pour les mines), par des usines modernes moins énergivores (le cas de la nouvelle usine d'enrichissement GB II est le plus marquant) et des efforts poursuivis depuis de nombreuses années pour réduire l'empreinte environnementale sur les différents sites.

A noter toutefois que, malgré les efforts d'inventaires réalisés, l'exhaustivité des sources d'émissions de gaz à effet de serre n'est pas l'objectif de cette étude (par exemple les transports liés aux matières premières ne sont pas pris en compte). En effet, celle-ci repose sur un exercice de comparaison entre deux cycles industriels. Aussi la fiabilité de cette valeur reste discutable, même si l'ordre de grandeur paraît cohérent avec les publications disponibles.

5.3.5 Comparaison des deux scénarios

Il s'agit de comparer l'écart entre les deux scénarios dans des conditions équivalentes de façon à déterminer si la différence est significative ou non, compte tenu des nombreuses hypothèses et des incertitudes associées (cf. § 3).

Les réacteurs ont quasiment les mêmes impacts potentiels dans les deux scénarios et donc ils n'entrent pas en jeu dans la comparaison.

On définit l'écart relatif entre les deux scénarios de la façon suivante pour chaque catégorie d'impact :

$$\text{Ecart relatif} = (\text{valeur (cycle ouvert)} - \text{valeur (cycle actuel)}) / \text{valeur (cycle actuel)},$$

de telle sorte qu'un écart négatif est favorable au cycle ouvert puisqu'on minimise alors l'impact associé et vice-versa. Les écarts entre les deux cycles sont présentés sur les Figure 11 à Figure 13.

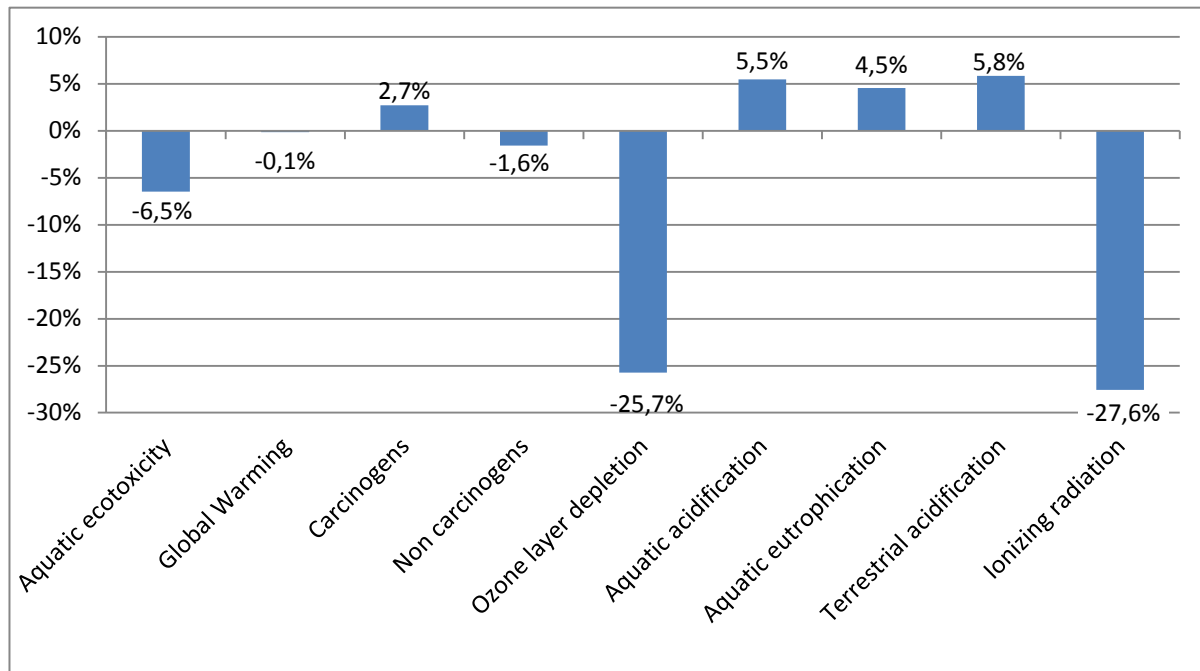


Figure 11 : Ecarts relatifs des catégories IMPACT2002+ entre le cycle actuel et un cycle ouvert, sans rejets potentiels des résidus miniers

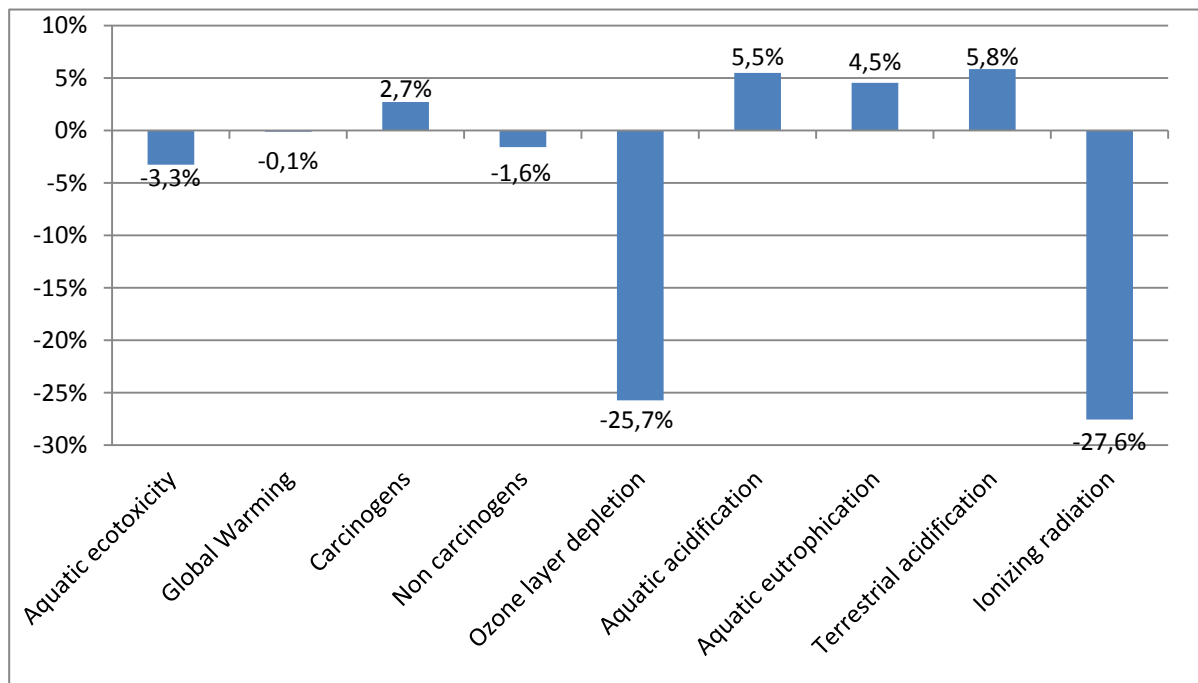


Figure 12 : Ecarts relatifs des catégories IMPACT2002+ entre le cycle actuel et un cycle ouvert, avec rejets potentiels des résidus miniers

L'écart entre les cycles ouverts et actuels dans la catégorie « aquatic ecotoxicity » est légèrement modifié selon que l'on prenne en compte ou non les rejets liquides potentiels des mines. Cela est dû aux rejets aqueux des mines qui impactent plus le cycle ouvert que le cycle actuel. Les écarts relatifs entre les deux cycles ne sont pas modifiés pour les autres catégories d'impact.

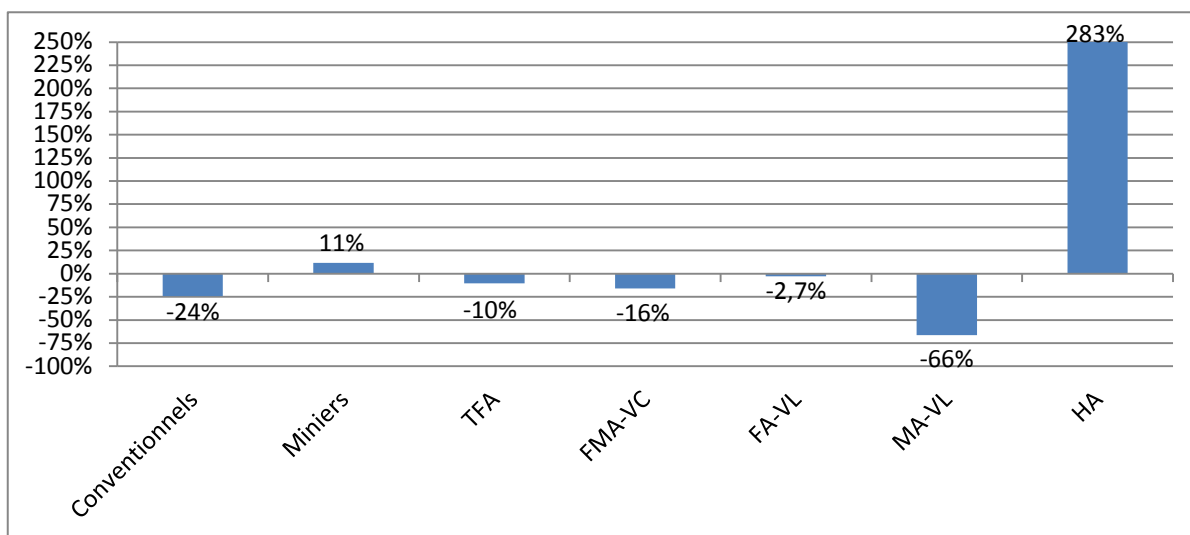


Figure 13 : Ecarts relatifs des volumes de déchets entre le cycle actuel et un cycle ouvert

D'autres indicateurs ont été suivis au cours de cette étude. La comparaison de leurs valeurs dans les deux scénarios est présentée dans le Tableau 39.

Tableau 39 : Evolution de 4 autres indicateurs entre le cycle actuel et un cycle ouvert

		Cycle actuel	Cycle ouvert	Ecart relatif
Eau utilisée	m ³ /MWh	1,475	1,480	0,3%
Emission de poussières	t/MWh	5,693E-08	6,150E-08	8,0%
Surface des usines	ha/MWh	2,057E-05	2,188E-05	6,4%
Ressources en uranium	kg U/MWh	2,03E-02	2,26E-02	11,5%

Le seuil d'incertitude consensuellement admis en ACV est de l'ordre de 30 %. Ce seuil est à considérer en particulier dans l'interprétation de la Figure 11 et de la Figure 12.

Pour les indicateurs qui dépendent directement de la réduction de la consommation d'uranium naturel (par exemple « volume des déchets miniers »), ce seuil d'incertitude est à considérer en relatif sur 10% d'écart, soit de l'ordre de 3%.

Les écarts les plus marquants en relatifs sont les catégories « ionizing radiation » (- 28 %), « volume des déchets MA-VL » (- 66 %) et « volume des déchets HA » (+283%).

La synthèse des écarts entre les deux scénarios pour toutes les catégories d'impact est présentée en fin d'Annexe 7.

5.3.6 Analyse de l'origine des impacts potentiels

Toutes les usines ont été modélisées au cours de l'étude, de façon plus ou moins fine selon le niveau de connaissance de l'inventaire. Lors de la présentation des contributions relatives des différentes étapes du

cycle aux catégories d'impact, un regroupement par grandes étapes (mines, conversion,...) a été privilégié, mais le détail pour chaque usine est disponible.

Quelques exemples sont présentés dans les figures suivantes. Pour les réacteurs, il s'agit de l'ensemble du parc français soit 34 réacteurs de 900 MW, 20 de 1300 MW et 4 de 1450 MW.

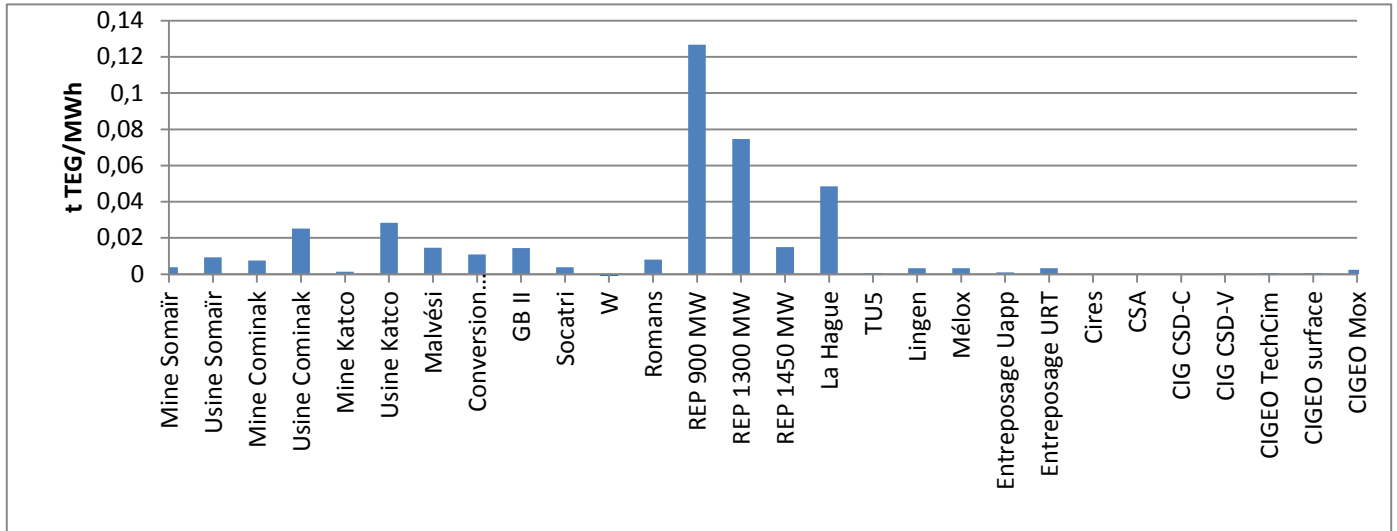


Figure 14 : Valeurs de l'impact « aquatic ecotoxicity » par usine pour le cycle actuel

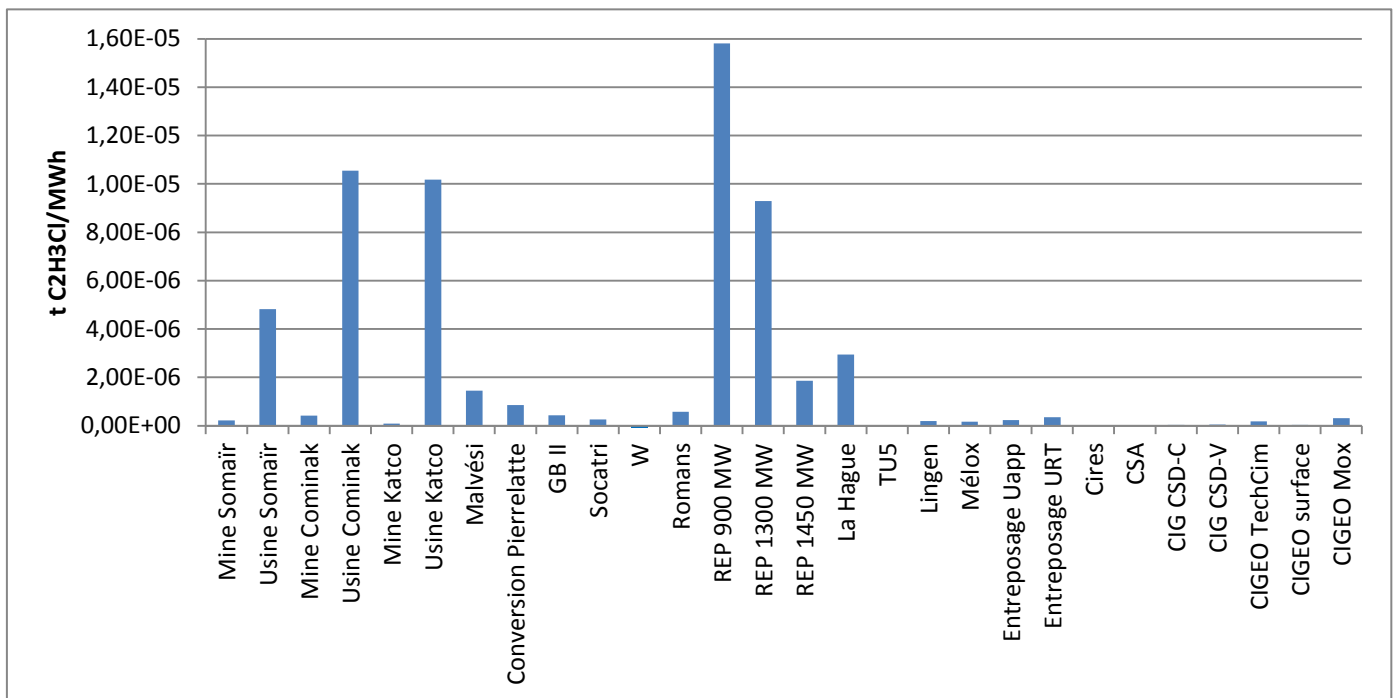


Figure 15 : Valeurs de l'impact « carcinogènes » par usine pour le cycle actuel

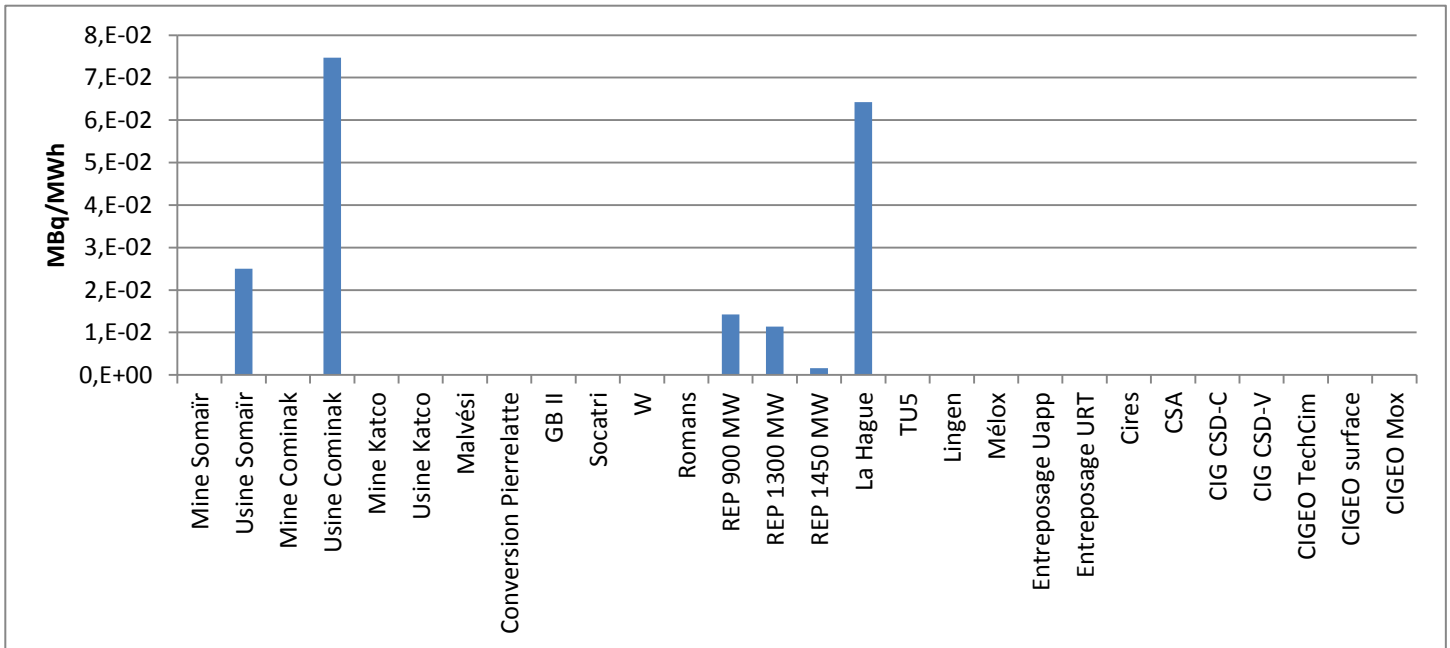


Figure 16 : Valeurs de l'impact « Ionizing radiation » par usine pour le cycle actuel

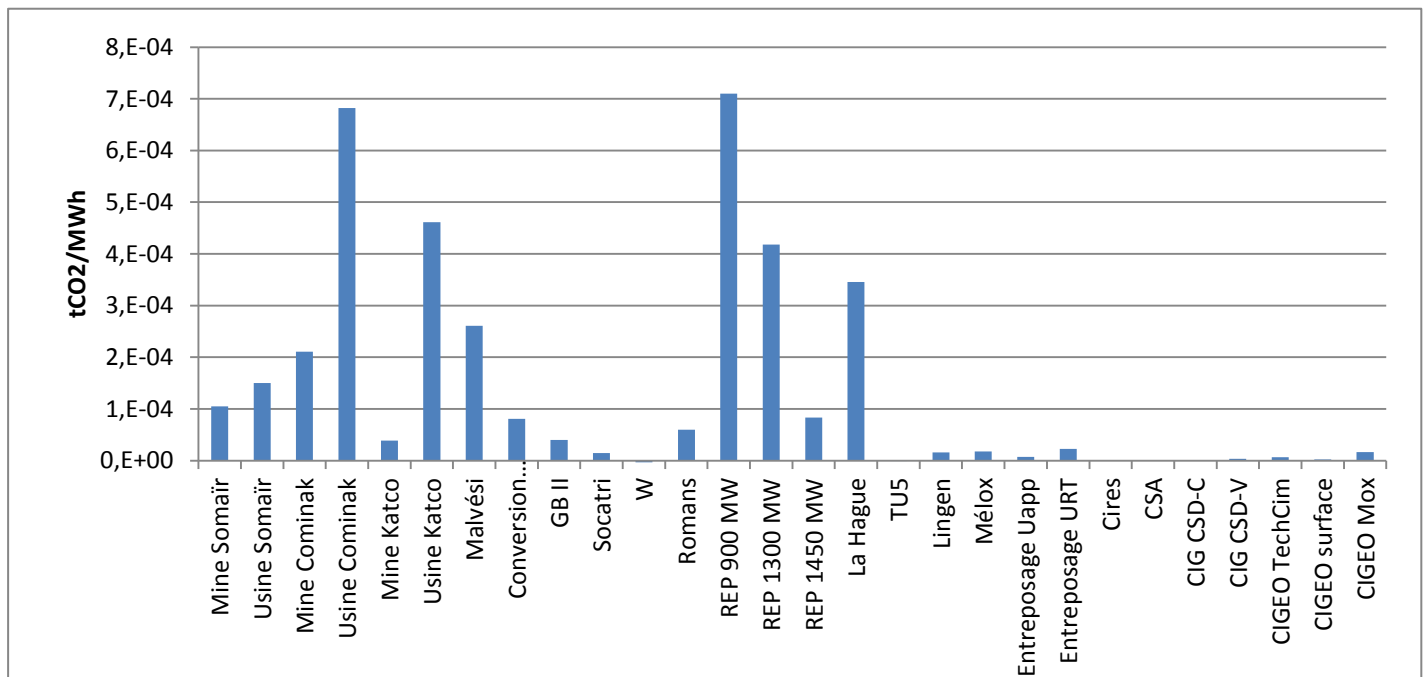


Figure 17 : Valeurs de l'impact « global warming » par usine pour le cycle actuel

6 CONCLUSION

6.1 Bilan

Cette étude, qui fait suite à plusieurs autres consacrées au cycle électronucléaire français a permis de décrire de façon très complète les deux scénarios demandés par l'article 9 du PNGMDR 2016-2018 (cycle actuel et cycle fermé), et de les comparer en terme de bilan environnemental global, en prenant en compte toutes les étapes du cycle du combustible nucléaire, y compris les entreposages intermédiaires pour les matières valorisables et les déchets, et sur la base de données de fonctionnement recueillies pour chaque usine du cycle considéré. Cet inventaire a été complété sur la base de données issues de référence de la littérature, ou sur la base d'évaluations du CEA. Les déchets de démantèlement ont fait l'objet d'une évaluation sur la base de l'étude réalisée pour l'article 51 du même PNGMDR [Saturnin 2018].

Cette étude repose sur un outil (logiciel NELCAS) qui permet de décrire les différentes usines considérées dans chaque scénario, et intégrant

- les facteurs de caractérisation des différentes catégories de la méthode IMPACT2002+, qui a été choisie,
- d'autres catégories d'indicateurs, jugés également importants pour l'industrie nucléaire (déchets radioactifs par exemple),
- les différentes phases de vie des installations considérées (construction, exploitation,...).

Les calculs d'impact ont été effectués afin de déterminer plusieurs influences :

- la contribution respective des différentes étapes du cycle pour chaque catégorie et dans les deux scénarios, avec la possibilité de déterminer quelles installations sont déterminantes ;
- la contribution des opérations de fonctionnement/transport par rapport à celles de construction/démantèlement pour les différentes catégories d'impact ;
- enfin, la comparaison entre les deux scénarios pour l'ensemble des catégories d'impact.

Les résultats de cette étude permettent de répondre aux objectifs de l'étude demandée. L'interprétation prudente de ces résultats doit prendre en compte le fait que des données ne sont parfois pas disponibles, ce qui nécessite un nombre important d'hypothèses et d'extrapolation.

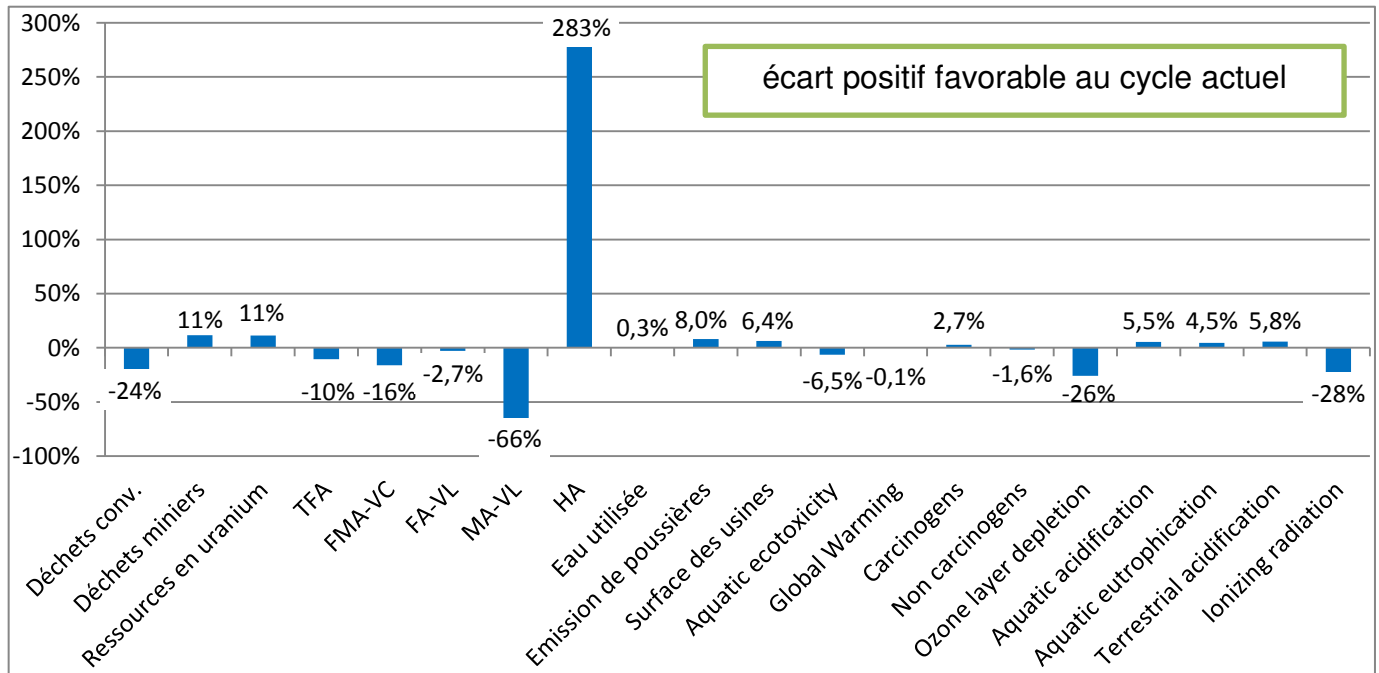


Figure 18 : Ecarts relatifs entre le cycle actuel et un cycle ouvert

Les écarts entre les deux scénarios pour les différentes catégories sont généralement faibles (75 % des indicateurs présentent moins de 20 % de différence en relatif).

Les indicateurs « déchets miniers » et « ressources en uranium » (+11%) sont directement et mathématiquement liés aux économies en uranium apportées par le seul recyclage du plutonium. En terme de volume absolu, l'effet positif du cycle actuel sur les déchets miniers dépasse de loin l'effet négatif sur les déchets conventionnels.

L'indicateur « ionizing radiation » (-28%) est dominé par les rejets de C14 de La Hague et les rejets à « long terme » de Rn222 des résidus miniers. Pour ce dernier résultat, la comparaison dépend en définitive de la modélisation du comportement des résidus miniers et du mix des mines considérées, qui en l'état comportent de fortes incertitudes. En particulier, la tenue dans le temps des couvertures qui seront mises en place est déterminante dans cette comparaison.

Les indicateurs « volume de déchets MA-VL » (-66%) et « volume de déchets HA » (+283%) sont directement impactés par l'activité des usines de l'aval : traitement des combustibles usés et conditionnement des déchets de haute activité, qui permettent avec le cycle actuel une réduction importante du volume de déchets HA, au prix d'un accroissement du volume de déchets MA-VL. Le bilan reste nettement positif si l'on considère un indicateur « volume des déchets HA + MA-VL », déchets destinés à CIGEO (voir Annexe 8.7). L'indicateur « volume » est assez simple à calculer. D'autres indicateurs seraient pertinents, en particulier l'emprise des déchets dans CIGEO. L'emprise calculée sur la base des critères thermiques figure dans (CEA 2015) ,avec et sans prise en compte des combustibles MOX usés. Le même exercice est prévu sur la base des nouveaux critères thermiques et thermo-hydro-mécaniques. (CEA, 2015)

6.2 Perspectives

De nombreuses hypothèses ont été émises, et de nombreux jeux de données ont été estimés. Chaque hypothèse mériterait, en toute rigueur, de faire l'objet d'une étude de sensibilité afin d'évaluer les conséquences sur les écarts entre les deux scénarios.

A l'issue de cette étude d'ACV, les perspectives d'amélioration sont les suivantes :

➤ Concernant la méthodologie :

- Travail en amont avec la communauté des chercheurs en ACV pour tenter de compléter les facteurs de caractérisation manquants. C'est le cas de certains produits chimiques (ex : métaux sous forme de poussières, zirconium métallique, polluants présents dans les rejets liquides tels que bore, ammonium), et d'un bon nombre de radionucléides (I129...). Ce travail concerne la communauté des chercheurs et n'est pas une suite de l'étude en tant que telle.
- Prise en compte d'indicateurs supplémentaires tels que l'emprise des déchets au stockage

➤ Concernant les inventaires :

- Evaluation plus précise des matériaux de construction et des métaux, en incluant si possible et de façon homogène les appareils et équipements de procédé et les protections biologiques (plomb) ainsi que les canalisations d'amenée des fluides et réactifs
- les énergies de construction et de déconstruction des installations mériteraient d'être précisées (cf. Annexe 8)
- Inventaire plus exhaustif des réactifs utilisés en quantité notable pour toutes les installations. Si possible localisation des fournisseurs correspondants pour ajuster les fiches avec un impact plus réaliste de leur transport (cas des mines excentrées en priorité)
- Lissage des consommations, des rejets et des quantités de déchets sur plusieurs années afin d'être en mesure de garantir l'utilisation de données représentatives
- pour les mines à ciel ouvert (MCO) et mines souterraine (MS), considérer des rejets liquides potentiels associés aux stockages de résidus plus réalistes (étude de comportement à long terme)

➤ Concernant les hypothèses :

- le mix minier à un moment donné n'est pas incertain en tant que tel, mais peut évoluer dans le temps et modifier les résultats obtenus, notamment sur les émissions de radon
- pour Cigéo, prise en compte des données de dimensionnement du stockage les plus récentes

Enfin, il est important de rappeler que le bilan environnemental, tel que traité dans le cadre de cette étude, ne constitue qu'un des aspects utiles à une comparaison entre deux options industrielles. En effet, une comparaison au titre des critères du développement durable nécessite de procéder à une évaluation prenant en compte les aspects économiques, sociaux et sociétaux, afin de pouvoir fournir un panorama complet.

7 Références bibliographiques

Alhacen A. Le cas de l'exploitation de l'uranium au Niger, 18ème session des Nations Unies sur le développement durable, mai 2010

ANDRA, Documents techniques C.RP.ASTE.09.0707 du 6/04/2010 et C.NT.ADPG.12.0007 de 03/2012.

ANDRA, Inventaire national des matières et déchets radioactifs 2018,

https://inventaire.andra.fr/sites/default/files/documents/pdf/fr/andra-les_essentiels-2018.pdf

Ashley S. F. (2015). "Life-cycle impact from novel thorium-uranium-fuelled nuclear energy systems", Energy Conversion and Management 101, 136-150

CEA (2015, "Avancées des recherches sur la séparation-transmutation et le multi-recyclage du plutonium dans les réacteurs à flux de neutrons rapides",

<http://www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/rapports/avancees-recherches-separation-transmutation-et-multirecyclage-pu-rnr.pdf>

Derwent R.G. (1996), Photochemical ozone creation potentials for a large number of reactive hydrocarbons under European conditions, Atmospheric Environment 30 (2), 181-199.

Doka G., Life Cycle Inventory of generic uranium in-situ leaching, novembre 2011,

<http://www.doka.ch/DokaSL.pdf>

Dones R. et al. (2003), "Life Cycle Inventories of Energy Systems: Results for Current Systems in Switzerland and other UCTE Countries", Paul Scherrer Institut, Villigen, and Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland. www.ecoinvent.ch

Dones R., "Uranium Ore Processing", Ecoinvent report 6-VII (2009)

Elecnucl, Les centrales nucléaires dans le monde, CEA, éditions 2014 à 2017

Frischknecht R. et al. (2000). "Human health damages due to ionising radiation in life cycle impact assessment." Environmental Impact Assessment Review 20, 159-189

Gonin A.S. (2011). Pré-évaluation de l'impact sanitaire relatif aux rejets du site de Cominak et Somaïr, Note technique AREVA D3SE/DEHS

JRC (Joint Research Centre of the European Commission), International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook (2011)

La radioactivité.com : http://www.laradioactivite.com/site/pages/Entreposage_Combustibles_Uses.htm, consulté fin octobre 2018

Lenzen M. (2008). "Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review", Energy Conversion and Management 49, 2178–2199

Loi TSN du 20/06/2006, article 20, codifié depuis par les articles L.594-1 et suivants du code de l'environnement. <https://www.asn.fr/Informer/Dossiers-pedagogiques/La-gestion-des-dechets-radioactifs/Les-enjeux-de-la-gestion-des-dechets-radioactifs/Un-financement-a-long-terme>

Ministère de l'Environnement (2017). "Arrêté du 23 février 2017 pris en application du décret n° 2017-231 du 23 février 2017 pris pour application de l'article L. 542-1-2 du code de l'environnement et établissant les prescriptions du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs", Journal officiel de la République française

Pays M. (2016). "L'exploitation du combustible en réacteur, mode de gestion, fiabilité industrielle et perspectives", Journée technique SFEN, 24/11/2016

Poinssot C. et al. (2014). "Assessment of the environmental footprint of nuclear energy systems. Comparison between closed and open fuel cycles", Energy 69, 199-211

Réseau de Transport d'Electricité RTE (2016), Bilan électrique 2015

https://www.rte-france.com/sites/default/files/2015_bilan_electrique.pdf

Saturnin A. (2017). "Evaluation des déchets et des matières produits par le démantèlement - Comparaison avec l'exploitation." Note CEA/DMRC/SA2I 2017-19

Saturnin A. (2018). "Paliers et scénarios de multirecyclage du plutonium en RNR et REP – Bilan des déchets radioactifs (PNGMDR 2016-2018)", Note CEA/DMRC/SA2I 2018-27

Sovacool B. K. (2008). "Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey." Energy Policy 36(8), 2950-2963

Turconi R. et al. (2013). "Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations", Renewable and Sustainable Energy Reviews 28, 555-565

Warner E.S. et al. (2012). "Life cycle greenhouse gas emissions of nuclear electricity generation", Journal of Industrial Ecology 16, 73-92

Weisser D. (2007). "A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies." Energy 32(9), 1543-1559.

8 ANNEXES

8.1 Annexe 1 : Inventaire de fonctionnement des usines

Mine et usine SOMAÏR

Production annuelle		Besoins en énergie				Réactifs						Eau Consommé e	Surface occupée
Année de référence	Production année de référence	Gasoil	Essence	Fioul domestique	Electricité	H2SO4 (t)	NH4NO3 (t)	Carbonate (t)	Explosif (t)	NaOH (t)	Keroil (t)	m ³	ha
	t	m3	m3	m3	MWh	t	t	t	t	t	t		
2 015	2 509	566,5	189,8	19 870	32 554	112 133	838	6 285	3 807	3 682	678	2 794 549	3000

80 kg/t
mineral

Emissions gazeuses non radioactives				Particules	Déchets conventionnels		Emissions gazeuses radioactives
SOx	NOx	COV	Gas appauvrissant la couche d'ozone		DND	DD	Radon
t	t	t	kg eq CFC-11	t	t	t	MBq
768	1074	774,1	49,4	141,4	1041	806	1.505e+11

Mine et usine COMINAK

Production annuelle		Besoins en énergie				Eau Consommée	Surface occupée
Année de référence	Production année de référence	Gasoil	Essence	Fioul domestique	Electricité	(m ³)	(ha)
	t	m3	m3	m3	MWh		
2 015	1 607	432,4	80,0	8572	61011	2 049 093	1200

Réactifs							
Explosifs	H2SO4	NH4NO3	NaCl	Na2CO3	MgO	Alamine 336	Keroil
t	t	t	t	t	t	t	t
466	53 839	1 138	4 722	1 964	383	41	208

10 kg/t
minerai

Emissions gazeuses non radioactives			Particules	Déchets conventionnels		Emissions gazeuses radioactives
SOx	NOx	COV		DND	DD	Radon
t	t	t	t	t	t	MBq
492	688	223,9	20,2	351,09	190,19	9,6E+10

Mine et usine KATCO

Production annuelle		Besoins en énergie				Réactifs			Eau prélevée	Surface occupée
Année de référence	Production année de référence	Gasoil	Essence	Fioul domestique	Electricité	H2SO4	NH4NO3	NH4OH 28 %	(m ³)	(ha)
	t	m3	m3	m3	MWh	t	t	t		
2 015	4 007	3 024	486	7325	91039	177 820	10 018	47 225	595 555	1100

44,4
kg/kgU

0,149
m3/kgU

Emissions gazeuses non radioactives				Déchets conventionnels		Déchets radioactifs
SOx	NOx	COV	Gaz appauvrissant la couche d'ozone	DND	DD	TFA
t	t	t	kg eq CFC-11	t	t	t
3,8	4,5	0,21401	3,41	931	58,1	532

Usine de Malvési

Production annuelle		Besoins en énergie					Réactifs				Eau prélevée	Surface occupée
Année de référence	Production année de référence	Propane	Gaz naturel	Gazole	Fioul domestique	Electricité	HNO3 28 %	NH3	HF	Isane	m ³	ha
	t	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	t	t	t	t		
2 016	9 027	65	56 754	6 000	1 960	39 643	12943	1 734	3 033	40,81	271 347	80
	Calcul t eq CO2	15 625		1 806	625	206						30,1 m3/tU
		18 263										

Emissions gazeuses non radioactives								Particules (poussières)	Effluents liquides						Déchets conventionnels	
N ₂ O	NO _x	NH ₃	SO ₂	HF	HCl	COV	Isane (émission diffuse)		Nitrates	Fluor	Ammonium	Uranium	DCO	MES	DND	DD
t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	
221,2	57,6	18,6	0,1	0,05	0,01	21,37	13,09	3,62	0,898	0,0256	0,029	1,83E-04	3,796	1,099	252,7	19,7

F assimilé à HF

dont 31 kg U

Emissions gazeuses radioactives		Déchets radioactifs
U	Radon	TFA
MBq	MBq	t
779	2,02E+06	1 907

Usine de conversion de Pierrelatte

Production annuelle		Besoins en énergie					Réactifs					Eau prélevée	Eau rejetée	Surface occupée
Année de référence	Production année de référence (t)	Gasoil	Essence	Fioul domestique	Fioul lourd	Electricité	KF,2HF	HF	KOH	H2SO4	chaux	m ³	m ³	ha
	tML	m3	m3	t	t	MWh	t	t	t	t	t			
2 015	9 019	15	1,2	28,9	2 193	66 465	30	2 508	498	124	328	529295	510999	15

Emissions gazeuses non radioactives				Effluents liquides							
SOx	NOx	Uranium	Fluorures	Arsenic	Cadmium	Zinc	Uranium	Fluorures	Fer	MES	Azote Total
t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
4,10E+00	1,44E+01	1,68E-03	6,85E-01	6,20E-03	1,00E-05	9,60E-04	5,10E-04	9,10E-02	3,21E-03	2,09E-01	2,17E-01

Effluents liquides									
Chrome Hexavalent	Chrome Total	Nickel	Oxygène DCO	Oxygène DBO5	Hydrocarbures	Cuivre	Phosphore	Aluminium	Manganèse
t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
3,70E-04	1,10E-03	2,10E-04	1,94E-01	9,30E-02	4,00E-04	1,00E-04	1,04E-02	1,76E-03	1,30E-04

Déchets conventionnels		Emissions gazeuses radioactives			Rejets liquides radioactifs					Déchets radioactifs
DND	DD	Alpha	Bêta	Isotopes U	Tritium	Alpha	Bêta	Tc99	Carbone14	TFA
t	t	MBq	MBq	MBq	MBq	MBq	MBq	MBq	MBq	t
555,35	1785	3,16E+01	1,52E+01	1,09E+01	3,40E+01	7,00E+01	6,00E+02	1,90E+02	2,80E+02	158

Usine d'enrichissement GB II

Production annuelle		Besoins en énergie		Eau prélevée	Surface occupée
Année de référence	Production année de référence	Fioul + Gazole (t)	Electricité (MWh)	m ³	ha
	t U enrichi	t	MWh		
2 016	1200	19,51	285931	9 092	35

Emissions gazeuses non radioactives		Déchets conventionnels		Emissions gazeuses radioactives	Déchets radioactifs
CFC	HF	DND	DD	Alpha	TFA
t	t	t	t	MBq	t
1,209	6,00E-04	1,28E+02	6,52E+00	3,00E-02	7,42

Remarque : les effluents radioactifs de GB II sont comptabilisés sur l'usine SOCATRI.

Usine SOCATRI – Pierrelatte (1/2)

Cette usine ne transforme pas d'uranium mais est associée à l'usine d'enrichissement, indispensable pour la maintenance des conteneurs, les traitements de surface et d'effluents. Pour la modélisation, sa production est considérée comme la même que celle de l'usine GB II.

Production annuelle		Besoins en énergie				Eau prélevée	Surface occupée
Année de référence	Production année de référence	Electricité	Fioul domestique	Gasoil	Essence	m ³	ha
	t						
2 016	1200	17546	56,1	61,6	4,8	1 608 584	24

Emissions gazeuses non radioactives					Effluents liquides							
SOx	NOx	Chrome Hexavalent	Nickel	COV	Sulfates	Nitrates	Arsenic	Zinc	Uranium	Fluorures	Potassium	Fer
t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
2,50E-03	9,60E-02	6,00E-05	2,31E-03	1,89E-01	5,56	3,24	4,90E-05	6,00E-05	2,12E-04	2,30E-02	6,13E+01	3,50E-03

Effluents liquides											
MES	Chlorures	Azote Total	Nitrites	Chrome Hexavalent	Chrome Total	Nickel	Oxygène DCO	Oxygène DBO5	Hydrocarbures	Cuivre	Phosphore
t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
1,20E-01	5,73E+01	7,590E-01	1,86E-03	1,80E-04	3,90E-04	2,90E-04	1,67E-01	1,30E-02	1,76E-03	1,50E-04	1,70E-04

Usine SOCATRI – Pierrelatte (2/2)

Déchets conventionnels		Emissions gazeuses radioactives				Rejets liquides radioactifs		Déchets radioactifs
DND	DD	Alpha	Bêta	Tritium	C14	Alpha	Bêta	TFA
t	t	MBq	MBq	MBq	MBq	MBq	MBq	t
38,50	23,40	3,40E-01	1,31E+00	5,20E+02	7,60E+02	1,60E+01	1,84E+03	923,65

Usine W

Production annuelle		Besoins en énergie				Eau consommée	Surface occupée
Année de référence	Production année de référence	Propane	Gasoil	Fioul domestique	Electricité	m ³	ha
	t U	m3	m3	m3	MWh		
2 016	10 391	10,25	5,21	14	18180	31 952	0,8

Emissions gazeuses non radioactives	Effluents liquides		Impacts évités	Déchets conventionnels		Emissions gazeuses radioactives	Déchets radioactifs
	Uranium	Fluor		DND	DD		
HF	Uranium	Fluor	HF 36 % *	DND	DD	Isotopes U	TFA
t	t	t	t	t	t	MBq	t
4,41E-03	1,08E-03	2,25E-01	14492	126,675	4,48	0,03733	40,56

(*) : l'usine produit de l'HF à 70 % en masse, mais une conversion est effectuée pour l'exprimer à la concentration de l'azéotrope (cf. § 4.2.3).

Usine de Romans

Production annuelle		Besoins en énergie				Réactifs					Eau prélevée	Surface occupée	Impacts évités
Année de référence	Production année de référence	Gaz naturel	Gasoil	Fioul domestique	Electricité	Hydrogène	Azote	Zircaloy	Acier inox	Inconel	m ³	ha	HF 35 %
	t	MWh PCI	m3	m3	MWh	m3	m3	t	t	t			t
2 016	620	9 921	16	23.39	27871	550 000	1840000	164,3	182,28	9,92	30 371	22	830

Emissions gazeuses non radioactives	Effluents liquides			Déchets conventionnels		Emissions gazeuses radioactives			Rejets liquides radioactifs			Déchets radioactifs
	Fluorures	MES	Azote Total	DND	DD	Isotopes U	Transuraniens	Produits de fission	Isotopes de l'U	Transuraniens	Produits de fission	TFA
t	t	t	t	t	t	MBq	MBq	MBq	MBq	MBq	MBq	t
7,90E-03	1,06E-02	7,10E-02	1,04	440	61	0,1	0,7	2,3	70	0,2	16	562

Réacteurs EDF : Toutes les données sont rapportées à 1 réacteur

	Production annuelle			Besoins en énergie
Année de référence	Production nette du parc : 419 TWh			Gazole
	900	1300	1450	900 /1300 /1450
	TWh			MWh
2015	5,990	8,715	10,357	5000

Réactifs	Eau consommée	Surface occupée
Acide borique		
900 /1300 /1450		
t/réacteur	m3	ha
5	10300000	21,5

Réacteurs EDF : Toutes les données sont rapportées à 1 réacteur
Les données relatives aux déchets et aux effluents ont été communiquées pour l'année 2016 par EDF.

Déchets radioactifs													
TFA						FMA VC						MA VL	
CNPE 900		CNPE1300			CNPE 1450		CNPE 900		CNPE1300		CNPE 1450		1 Tranche
m3	t	m3	t		m3	t	m3	t	m3	t	m3	t	m3
	40,0		37,57			17,2	26,08		40,63		47,65		0,83
Soit 2180 t pour l'ensemble du parc de 58 réacteurs						Soit 1890 m3 pour l'ensemble du parc de 58 réacteurs							
Soit une moyenne de 5,67E-06 t/MWh						Soit une moyenne de 3,86E-06 m ³ /MWh							

production nucléaire 2016(MWh) 3,84E+08 RTE : Bilan électrique français

Rejets liquides chimiques								
CNPE 900/CNPE1300/CNPE1450								
Acide borique	Sulfate	Sodium	Chlorures	Ammonium	Nitrates	Nitrites	AOX	Phosphate
t	t	t	t	t	t	t	t	t
5	24	26,24	36,61	0,69	24,51	0,37	0,79	0,18

Usine de retraitement de La Hague (1/3)

Production annuelle		Besoins en énergie						Eau consommée	Surface occupée
Année de référence	Production année de référence	Propane	Gasoil	Fioul lourd	Fioul domestique	Essence	Electricité	m ³	ha
	t ML	MWh	m3	t	t	t	MWh		
2 016	1 052	21,9	69,2	16 718	950,29	31,744	474494	474823	147

Réactifs								
NaOH 30 %	HNO3 60 %	NaNO2	Fritte de verre	Nitrate d'hydroxylamine	Hydrazine pure	Na2CO3	TBP	TPH
t	t	t	t	t	t	t	t	t
5 344	3593,82	865	314	266	38.85	49	35	23

Usine de retraitement de La Hague (2/3)

Emissions gazeuses non radioactives		Particules	Effluents liquides			
Protoxyde d'azote	CO	Poussières	TBP	Nitrates	Nitrite	Hydrazine
t	t	t	t	t	t	t
114	1,7	4,93	1,26	2060	35,8	0,00441

Effluents liquides									
Cobalt	Baryum	Fer	Nickel	Soufre	Potassium	Aluminium	Chrome	Plomb	Zirconium
t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
0,00169	0,0156	0,0602	0,00603	5,41	1,79	0,0775	0,0025	0,00366	0,00149

Effluents liquides								
Manganèse	Cadmium	Hydrocarbures	Phosphore	Fluorure	DCO	Zinc	Ammonium	Mercure
t	t	t	t	t	t	t	t	t
0,0196	0,000664	0,191	0,144	0,00545	14,3	0,0225	0,0289	0,00024

Usine de retraitement de La Hague (3/3)

Emissions gazeuses radioactives						Rejets liquides radioactifs			
Gaz rares	Iodes	Tritium	Bêta gamma	Alpha	C14	Tritium	Iodes	C14	Sr90
MBq	MBq	MBq	MBq	MBq	MBq	MBq	MBq	MBq	MBq
3,20E+11	6,41E+03	7,45E+07	1,04E+02	0,409	1,91E+07	1,23E+10	1,44E+06	7,55E+06	97000

Rejets liquides radioactifs						Déchets conventionnels	
Césium134	Ruthénium106	Cobalt60	Bêta Gamma	Alpha	Césium137	DND	DD
MBq	MBq	MBq	MBq	MBq	MBq	t	t
5,03E+04	1,37E+06	5,80E+04	1,68E+06	2,3E+04	6,59E+05	2360	570

Déchets radioactifs							
TFA		FMA VC		MA VL (CSD-C)		HA	
m3	t	m3	t	m3	t	m3	t
1,26E+03		1,12E+03		468			339,2

Usine TU5 (conversion URT)

Production annuelle		Besoins en énergie	Eau consommée	Surface occupée	Gasoil	Fuel domestique	Essence
Année de référence	Production année de référence	Electricité	m ³	ha	m ³	m ³	m ³
	t U	MWh					
2 016	1 087	12862	1 866	0,2666	5,21	14	0,4

Emissions gazeuses non radioactives	Effluents liquides				Impact évité	Déchets conventionnels	
NOx	Nitrates	Chlorures	Sodium	Uranium	HNO3 68%	DD	DND
t	t	t	t	t	t	t	t
12,554	0,794	0,026	0,125	4,80E-04	1093	4,48	126,675

Emissions gazeuses radioactives					Rejets liquides radioactifs					Déchets radioactifs
Isotopes U	Produits de fission	Transuraniens	Tritium	C14	Isotopes de l'U	Produits de fission	Transuraniens	Tritium	C14	TFA
MBq	MBq	MBq	MBq	MBq	MBq	MBq	MBq	MBq	MBq	t
0,059	0,28	0,077	330	680	22	83	3	180	39	35,13

Usine MELOX

Production annuelle		Besoins en énergie				Réactifs			Eau consommée	Surface occupée
Année de référence	Production année de référence	Gazole	Fuel	Essence	Electricité	Zircaloy	Stéarate de Zinc	Porogène (AZB)	m ³	ha
	t ML	m3	m3	m3	MWh	kg	kg	kg		
2 016	124	7,986	473	0,692	35671	26 884	327	437	15 474	5

conversion en MWh 80,38 5493 6,108

source : <https://www.abraxasenergy.com/energy-resources/toolbox/conversion-calculators/energy/>

Effluents liquides				Déchets conventionnels		Emissions gazeuses radioactives	Rejets liquides radioactifs	Déchets radioactifs					
Sulfates	Chlorures	Sodium	Fluorures	DND	DD	Alpha	Alpha	TFA		FMA VC		MA VL	
t	t	t	t	t	t	MBq	MBq	m3	t	m3	t	m3	t
1,60E-03	9,00E-04	3,50E-03	5,00E-04	188	33	0,009	0,12		35		118		60

Stockage ANDRA TFA (CIRES) – Morvilliers (Aube)

Production annuelle		Surface occupée
Année de référence	Production année de référence	
	m3	ha
2 016	25 320	18

Emissions gazeuses radioactives				
Tritium	C14	Iodes	Bêta Gamma	Alpha
MBq	MBq	MBq	MBq	MBq
56,6	31,7	9,09E-03	2,30E-04	1,11E-03

Stockage ANDRA FMA-VC de l'Aube (Soulaines)

Production annuelle		Autres émissions de CO2	Surface occupée
Année de référence	Production année de référence	Mortier de ciment (à l'injection)	
	m3	t	ha
2 016	11 496	3542,4 (calcul CEA)	30

9188 colis

Mortier : 632 caissons de 5 m³ et 53 caissons de 10 m³, avec 80 % de taux d'enrobage

Déchets conventionnels		Emissions gazeuses radioactives					Rejets liquides radioactifs			
DND	DD	Tritium	C14	Iodes	Bêta Gamma	Alpha	Tritium	C14	Bêta Gamma	Alpha
m3	m3	MBq	MBq	MBq	MBq	MBq	MBq	MBq	MBq	MBq
1865,19	55,71	100	53	0,066	0,015	6,70E-04	0,34	0,22	0,12	0,0031

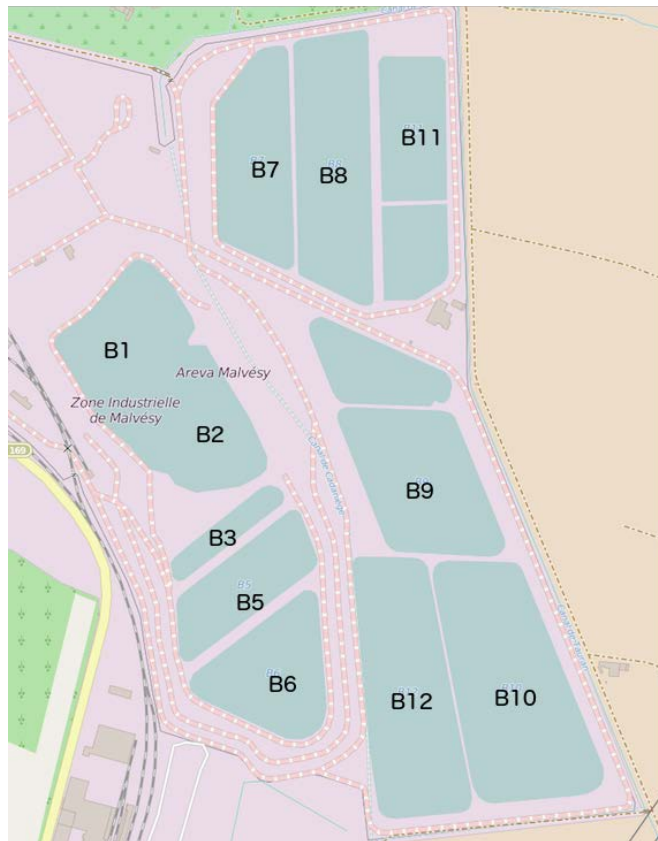
Allocation des déchets entre les différentes unités du Tricastin - Année 2016

Usine	Déchets (t)					
	DD	DND	Déchets conventionnels	Répartition déchets conventionnels	TFA	Répartition déchets TFA
Conversion (ex COMURHEX Pierrelatte)	1785	555	2340	88%	158,76	14%
SOCATRI	23,4	38,5	62	2%	924,00	80%
W	4,48	126,675	131	5%	40,56	4%
TU5	4,48	126,675	131	5%	35,13	3%
<i>W + TU5</i>	<i>8,96</i>	<i>253,35</i>				
INBS					0	
SOMME						
Total annoncé			2665		1158	100%
GB II + REC II	6,52	128,1	135		7,42	

Allocation de la consommation d'énergie entre les différentes unités du Tricastin - Année 2016

Usine	Propane (MWh PCI)	Répartition Propane	Fioul lourd (t)	Fioul domestique (t)	Répartition Fioul Domestique	Gazole (m3)	Répartition Gazole	Essence (m3)	Electricité (MWh)	Répartition électricité
Conversion	0		2182	24,7	25%	15	17%	1,2	66465	58%
SOCATRI		0%	0	49,4	50%	61,6	71%	4,8	17546	15%
W	10,25	50%	0	12,4	12,5%	5,21	6%	0,4	18180	16%
TU5	10,25	50%	0	12,4	12,5%	5,21	6%	0,4	12862	11%
INBS	20,5		2182	98,8		87,01408				
SOMME	20,5	100%	2182	98,8	100%	86,784	100%	6,804	115053	100%
Total annoncé									109038	
GBII + REC II	0		0 ?	0 ?		16,49		0	285931	

8.2 Annexe 2 : Emission de radon à partir des bassins B1 et B2 de Malvésí



Données :

Masses d'U et Th des différentes lithologies du contenu des bassins B1/B2 (extrait du Rapport de sûreté de l'INB Ecrin, en son tableau 38) :

m (U) = 677 t

m (Th) = 13,5 t.

Activité spécifique du Rn222 = 5,691 E+15 Bq/g

Activité spécifique du Rn220 = 3,412 E+19 Bq/g.

L'uranium présent dans les lagunes provient de la fraction non extraite lors de la purification à Malvésí ([U] < 10 mg/L) qui n'est pas en équilibre avec ses descendants. De même, le Th232 présent dans les boues n'est pas en équilibre avec ses descendants car la fraction entraînée avec l'uranium lors de la purification dans l'usine de traitement du minerai a été séparée de son descendant direct, le Ra228, dont le sulfate est très peu soluble.

Hypothèses :

La durée d'entreposage des boues les plus anciennes dans les bassins est de 58 ans (1960-2017).

La concentration des éléments radioactifs dans les boues est homogène.

Les boues sont entreposées uniformément sur toute la superficie.

Hypothèse complémentaire **dimensionnante** (notée 1) : la proportion de Th232 dans l'U naturel des concentrés arrivant à Malvési est estimée à 1 %. En effet, le tableau suivant présente les valeurs retenues pour les limites de concentration acceptables en thorium pour les transactions commerciales des concentrés miniers d'uranium, selon la norme internationale ASTM C 967 et selon celle utilisée au début des années 2000 par COMURHEX, filiale d'Areva.

Elément	Unité	ASTM C 967		COMURHEX	
		Pénalité	Rejet	Pénalité	Rejet
Th	%/U	1	2,5	1	4

Sans procéder à un inventaire de la composition moyenne des concentrés traités par l'usine de Malvési depuis 1960, on peut estimer une teneur en Th232 dans les concentrés d'au minimum 1 %/U puisque le thorium naturel est constitué à plus de 99% de son isotope 232. On retiendra cette valeur pour les calculs.

Le thorium n'est pas extrait par le TBP lors de la purification de l'uranium qui est pratiquée à la quasi-saturation du solvant. Ainsi, tout le thorium présent dans les concentrés se retrouve dans les raffinats d'extraction puis dans les lagunes.

Avec cette hypothèse (1), on trouve :

$$m(\text{Th}232) = 6,77 \text{ t}$$

$$m(\text{Th}234) = 9,6 \text{ mg (négligeable en raison de sa période courte de 24,1 j)}$$

$$m(\text{Th}230) = 6,73 \text{ t (T = } 8 \text{ E+4 an)}$$

$$m(\text{Th}228) = 0,9 \text{ mg (négligeable) ; T = 1,913 an.}$$

Méthode :

On se base sur le graphe de la variation de la quantité des boues dans les bassins B1 et B2 entre 1993 et 2010 (cf. courbe ci-après) et on extrapole avec une courbe adéquate la masse des boues entreposée de 1960 à 1992.

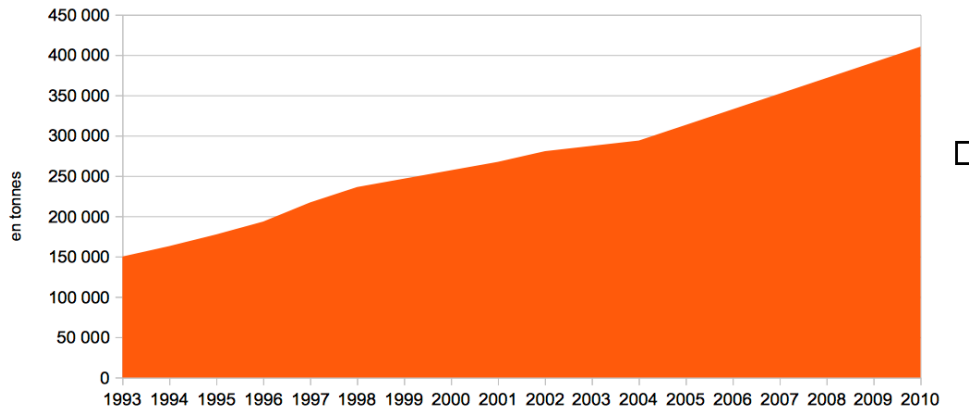
Entre 1960 et 1993, la variation de la masse des boues sera considérée comme une parabole

$$M(t) = a t^2 + b$$

Et entre 1993 et 2016, la variation de la masse des boues sera considérée comme une droite

$$M(t) = a t + b$$

Boues nitratées radioactives des bassins B1 et B2
Sources : Inventaires de l'ANDRA de 1993 à 2010



https://fr.wikipedia.org/wiki/Entreposage_confin%C3%A9_de_r%C3%A9sidus_issus_de_la_conversion

Année	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Masse (t)	150000	165000	185000	200000	217000	234000	250000	260000	270000
Année	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Masse (t)	280000	290000	300000	317000	334000	350000	370000	390000	420000

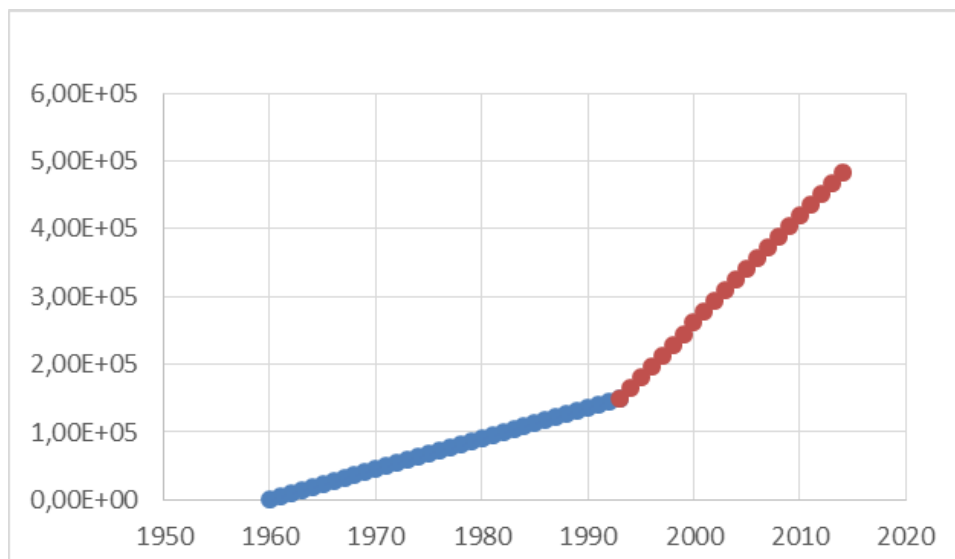
entre 1960 et 1993 parabole $y=ax^2+b$

a	1,15E+00
b	-4,42E+06

entre 1993 et 2016 droite $y=ax+b$

a	1,59E+04
b	-3,15E+07

Evolution de la masse des boues à Malvésí depuis 1960 (en tonnes)



On utilise le code de calcul CESAR pour déterminer l'activité du Rn222 obtenu par désintégration d'une tonne d'uranium naturel (avec prise en compte de sa teneur en U238) et du Rn220 à partir d'une tonne de Th232, puis on détermine les masses précises d'U et de Th ajoutées au cours des années. On néglige la teneur en U235 qui conduit à l'émission de Rn219 (T= 3,96 s).

On calcule année après année les activités des deux isotopes du radon émises, compte tenu des masses d'U238 et de Th232 incrémentées chaque année. On comptabilise l'impact des émissions des deux isotopes du radon dues aux quantités de boues accumulées depuis 1960 en prenant en compte la durée entre le temps de l'ajout des boues et l'année choisie comme référence (2016 dans le cas présent). On effectue enfin la somme de toutes les contributions qui sont émises durant l'année de référence.

Résultats

Emission de radon en 2016 prenant en compte les contributions encore actives des années précédentes :

Rn222 (MBq/an)	2,02E+06
Rn220 (MBq/an)	1,90E+04
Total radon (MBq/an)	2,04E+06

On constate que la contribution du Rn220 est négligeable (0,93 % du radon total), malgré la proportion de Th232 considérée initialement.

La comparaison avec les résidus de traitement d'une mine (Cominak = 3,69E+8 MBq/an selon la méthode empirique) conduit à un rapport : usine de conversion/ mine = 0,55 %, compte tenu des hypothèses considérées.

8.3 Annexe 3 : Inventaire ANDRA des déchets FA-VL lors du démantèlement des installations

Référence :

https://inventaire.andra.fr/sites/default/files/documents/pdf/fr/andra-les_essentiels-2018.pdf

Exploitant	Volume prévu à fin 2040 (m3)	Famille de déchets	Intitulé ANDRA	Contribution pour le PNGMDR 2016-2018 art. 9	Commentaires
Orano	330	Boues provenant du lavage des conteneurs d'UF6	F6-1-02	330	Les déchets KDU sont actuellement entreposés dans des fûts métalliques avec un revêtement interne (sache en polyéthylène). Le conditionnement de stockage n'a pas été étudié à ce jour.
	3748	Déchets issus des décanteurs et fosses conditionnés en CFB-C2K (Orano/La Hague)	F9-3-02	3748	
	1614	Colis de déchets solides d'exploitation cimentés produits depuis 1994 (Orano/La Hague)	F9-3-03	1614	
	40000	RTCU FA-VL Malvésí		40000	https://inventaire.andra.fr/sites/default/files/documents/pdf/fr/andra-synthese-2018-web.pdf
Framatome	4835	Colis de déchets radifères (CEZUS)	F6-8-03	4835	résidus de carbochloration et de sublimation

Framatome est une filiale d'EDF depuis début 2018.

Répartition des déchets de CEZUS :

Usine	Production 2016 (t ML)	Répartition (t)
Romans	620	4029
Mélox	124	806

8.4 Annexe 4 : Fiches Ecoinvent 3.1 des réactifs

Les substituts considérés sont notés en bleu.

Réactif	Référence Ecoinvent
Acide Borique	1 ton Boric acid, anhydrous, powder {RER} production APOS, U
Acide Fluorhydrique	1 ton Hydrogen fluoride {GLO} production APOS, U
Acide Nitrique (50%)	1 ton Nitric acid, without water, in 50% solution state {RER} nitric acid production, product in 50% solution state APOS, U
Acide Sulfurique	1 ton Sulfuric acid {RER} production APOS, U
Acier	1 ton Steel, low-alloyed {RER} steel production, converter, low-alloyed APOS, U
Acier inox	1 kg Steel, chromium steel 18/8 {RER} steel production, converter, chromium steel 18/8 APOS, U
Alamine 336	1 ton Triethylamine {RER} production APOS, U
Aluminium	1 kg Aluminium, primary, ingot {GLO} production APOS, U
Azodicarbonamide (porogène utilisé dans les usines de fabrication de combustibles)	1 ton Azodicarbonamide {RER} azodicarbonamide production APOS, U
Azote	1 kg Nitrogen, liquid {RER} air separation, cryogenic APOS, U
Béton	1 m3 Concrete, normal {RoW} unreinforced concrete production, with cement CEM II/A APOS, U
Carbonate de sodium	1 ton Soda ash, light, crystalline, heptahydrate {RER} soda production, solvay process APOS, U
Chaux	1 kg Limestone, crushed, for mill {RoW} production APOS, U
Chlorofluorocarbone (HFC)	1 kg 1,1-difluoroethane, HFC-152a {RoW} production APOS, U
Chlorure de sodium	1 ton Sodium chloride, brine solution {RER} production APOS, U
Ciment (mortier de)	1 kg Cement mortar {RoW} production APOS, U
Cuivre	1 kg Copper {RER} production, primary APOS, U
Electricité Kazakhstan	1 MWh Electricity, high voltage {KZ} market for electricity, high voltage APOS, U

Electricité lignite (Monde)	1 MWh Electricity, high voltage {RoW} electricity production, lignite APOS, U
Electricité (France)	1 MWh Electricity, high voltage market for APOS, U
Explosifs Tovex	1 ton Explosive, tovox {RoW} production APOS, U
Fritte de verre	1 ton Glass tube, borosilicate {RoW} production APOS, U
Hydrazine 35%	1 ton Hydrazine {RER} production APOS, U
Hydrogène	1 ton Hydrogen, liquid {RER} chlor-alkali electrolysis, diaphragm cell APOS, U
Hydroxyde de potassium (KOH)	1 ton Potassium hydroxide {RER} production APOS, U
Hydroxylamine	1 ton Hydroxylamine {RER} production APOS, U
Keroil/Isane/TPH (diluants des usines utilisant l'extraction liquide-liquide)	1 ton kerosene {Europe without Switzerland} petroleum refinery operation APOS, U
KF,2HF	1 kg Potassium chloride , as K ₂ O {RoW} magnesium production, electrolysis + 1 kg Hydrogen fluoride {GLO} production (au prorata des proportions massiques dans le mélange : 65-35 %)
Magnésie	1 ton Magnesium oxide {RER} production APOS, U
Nickel	1 kg Nickel, 99.5% {GLO} smelting and refining of nickel ore APOS, U
Nitrate d'Ammonium	1 ton Ammonium nitrate, as N {RER} ammonium nitrate production APOS, U
Nitrite de sodium	1 ton Sodium nitrite {RER} production APOS, U
Soude caustique 50%	1 ton Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {RER} chlor-alkali electrolysis, membrane cell APOS, U
Stéarate de zinc	1 ton Stearic acid {GLO} stearic acid production APOS, U
TBP	1 ton Triphenyl phosphate {GLO} triphenyl phosphate production APOS, U
Zircaloy	1 ton Chromium {RER} production APOS, U * 1,6 (voir § 4.2)

Fiches des carburants

Essence	1 MWh Petrol, unleaded, burned in machinery {GLO} APOS, U
Gasoil	1 MWh Diesel, burned in building machine {GLO} processing APOS, U
Fioul lourd	1 MWh Heavy fuel oil, burned in refinery furnace {RoW} processing APOS, U
Fioul domestique	Fiche "1 kg Light fuel oil {Europe without Switzerland} petroleum refinery operation" (sans la combustion), extrapolée avec la combustion à partir des valeurs du fioul lourd
Propane	1 MWh Propane, burned in building machine {GLO} APOS, U

Carburant	Densité à 15°C	Energie volumique (MWh/m ³)
Gazole	0,970	10,065
Essence	0,819	8,826
Fioul Lourd	0,995	11,613
Fioul Domestique	0,855	10,762

Proportion de la production dans l'impact total, combustion comprise, pour différents carburants

Catégorie d'impact	Essence	Fioul lourd	Diesel	Propane
Carcinogens	99%	85%	23%	47%
Non-carcinogens	12%	39%	53%	56%
Respiratory inorganics	15%	14%	7%	44%
Ionizing radiation	100%	100%	93%	91%
Ozone layer depletion	100%	100%	96%	96%
Respiratory organics	10%	85%	16%	59%
Aquatic ecotoxicity	93%	89%	85%	86%
Terrestrial ecotoxicity	57%	58%	77%	83%
Terrestrial acid/nutri	13%	17%	5%	36%
Aquatic acidification	32%	12%	14%	58%
Aquatic eutrophication	100%	100%	80%	78%
Global warming	16%	13%	13%	20%

On constate que la proportion de la production, ou en complément de la combustion, est très différente selon les catégories d'impact.

Pour zoomer sur le réchauffement climatique, on réalise que si l'on oublie la combustion, l'impact global est minimisé d'un facteur 5 environ.

8.5 Annexe 5 : Spectres radiologiques des usines

Légende : en bleu : valeur calculée car non déclarée par l'exploitant
 en vert : FC converti depuis une autre méthode qu'IMPACT2002+

Mines

Rejets gazeux

SOMAIR				COMINAK		
Radio-nucléides	FC (Bq C14 eq/Bq)	Activité (Bq/an)	Ionizing radiation (MBq C14 eq)	Radio-nucléides	Activité (Bq/an)	Ionizing radiation (MBq C14 eq)
238U	3,90E-02	2,39E+09	9,33E+07	238U	1,78E+09	6,93E+07
235U	1,00E-01	1,11E+08	1,11E+07	235U	8,28E+07	8,28E+06
234U		2,40E+09		234U	1,79E+09	
234Th		2,40E+09		234Th	1,79E+09	
231Th		1,11E+08		231Th	8,28E+07	
231Pa		1,11E+08		231Pa	8,28E+07	
234mPa		2,39E+09		234mPa	1,78E+09	
234Pa		3,82E+06		234Pa	2,84E+06	
227Ac		1,11E+08		227Ac	8,28E+07	
227Th		1,10E+08		227Th	8,17E+07	
230Th		2,40E+09		230Th	1,79E+09	
223Fr		1,54E+06		223Fr	1,14E+06	
223Ra		1,11E+08		223Ra	8,28E+07	
226Ra	4,33E-03	2,40E+09	4,83E+05	226Ra	1,79E+09	7,74E+06
219Ra		1,11E+08		219Ra	8,28E+07	0,00E+00
222Rn	1,14E-04	2,40E+09	2,75E+05	222Rn	1,79E+09	2,04E+05
218Po		2,40E+09		218Po	1,79E+09	
215Po		1,11E+08		215Po	8,28E+07	
214Pb		2,40E+09		214Pb	1,79E+09	
214Bi		2,40E+09		214Bi	1,79E+09	
214Po		2,40E+09		214Po	1,79E+09	
211Pb		1,11E+08		211Pb	8,28E+07	
210Pb		2,40E+09		210Pb	1,79E+09	
211Bi		1,11E+08		211Bi	8,28E+07	
210Bi		2,40E+09		210Bi	1,79E+09	
211Po		3,04E+05		211Po	2,26E+05	
210Po	7,14E-03	2,40E+09	1,72E+07	210Po	1,79E+09	1,28E+07
207Tl		1,11E+08		207Tl	8,24E+07	
Total Act.		3,49E+10	1,22E+08	Total Act.	2,59E+10	9,83E+07
Total Act. RN avec FC		9,71E+09		Total Act. RN avec FC	7,22E+09	
Taux Act. pris en compte		27,9%		Taux Act. pris en compte	27,9%	
Impact estimé (Bq)			4,39E+08	Impact estimé (Bq)		3,53E+08
Impact estimé (MBq)			4,39E+02	Impact estimé (MBq)		3,53E+02

Remarque : pour les mines, il ne s'agit que de l'activité contenue dans les poussières. Le radon calculé ici ne représente qu'une très faible proportion de ce qui émis par les différents contributeurs (mine, usine, résidus).

Rejets gazeux
KATCO

Radionucléides	Activité (Bq/an)	Ionizing radiation (MBq C14 eq)
238U	2,21E+09	8,64E+07
235U	1,03E+08	1,03E+07
234U	2,23E+09	
234Th	2,23E+09	
231Th	1,03E+08	
231Pa	1,03E+08	
234mPa	2,21E+09	
234Pa	3,54E+06	
227Ac	1,03E+08	
227Th	1,02E+08	
230Th	2,23E+09	
223Fr	1,42E+06	
223Ra	1,03E+08	
226Ra	2,23E+09	9,65E+06
219Ra	1,03E+08	
222Rn	2,23E+09	2,55E+05
218Po	2,23E+09	
215Po	1,03E+08	
214Pb	2,23E+09	
214Bi	2,23E+09	
214Po	2,23E+09	
211Pb	1,03E+08	
210Pb	2,23E+09	
211Bi	1,03E+08	
210Bi	2,23E+09	
211Po	2,82E+05	
210Po	2,23E+09	1,59E+07
207Tl	1,03E+08	
Total activité	3,23E+10	1,23E+08
Total activité RN avec FC	9,00E+09	
Taux activité pris en compte	27,9%	
Impact estimé (Bq)		4,40E+08
Impact estimé (MBq)		4,40E+02

Malvésí
Rejets gazeux

Radio-nucléides	FC (Bq C14 eq/Bq)	Activité (Bq/an)	Ionizing radiation (MBq C14 eq)
232U		9,67E+03	
228Th		8,76E+03	
224Ra		8,76E+03	
212Pb		8,76E+03	
212Bi		8,76E+03	
208Tl		3,15E+03	
234U	4,62E-01	6,06E+08	2,80E+08
230Th	2,14E-01	3,54E+06	7,58E+05
226Ra	4,33E-03	2,70E+05	1,17E+03
222Rn	1,14E-04	1,10E-03	1,25E-07
218Po		1,10E-03	
214Pb		1,10E-03	
214Bi		1,10E-03	
214Po		1,10E-03	
210Pb		5,09E+04	
210Bi		1E-05	
210Po	7,14E-03	3,21E-06	2,29E-08
218At		2,19E-07	
235U	1,00E-01	2,69E+07	2,69E+06
231Th		2,69E+07	
231Pa		2,17E+05	
227Ac		7,83E-03	
227Th		6,54E-03	
223Ra		5,97E-03	
219Rn		5,97E-03	
215Po		5,97E-03	
211Pb		5,97E-03	
211Bi		5,97E-03	
207Tl		5,95E-03	
211Po		1,67E-05	
223Fr		1,08E-04	
236U		5,93E+03	
238U	3,90E-02	5,85E+08	2,28E+07
234Th		5,86E+08	
234Pa(m)		5,86E+08	
234Pa		9,30E+03	
238Pu	3,19E-01	5,93E+02	1,89E+02
239+240Pu	3,95E-01	1,71E+05	6,76E+04
237Np		5,93E+02	
106Ru+Rh		1,19E+03	
99Tc		1,96E+03	
90Sr		4,07E+03	
241Am		5,93E+02	
Total Act.		2,42E+09	3,06E+08
Total Act. RN avec FC		1,22E+09	

Rejets liquides

Radio-nucléides	FC (Bq C14 eq/Bq)	Activité (Bq/an)	Ionizing radiation (MBq C14 eq)
232U		2,94E+03	
228Th		2,66E+03	
224Ra		2,66E+03	
212Pb		2,66E+03	
212Bi		2,66E+03	
208Tl		9,56E+02	
234U	1,14E-02	1,87E+08	2,13E+06
230Th		1,83E+06	
226Ra	6,19E-04	2,49E+05	1,54E+02
222Rn		1,01E-03	
218Po		1,01E-03	
214Pb		1,01E-03	
214Bi		1,01E-03	
214Po		1,01E-03	
210Pb		4,69E+04	
210Bi		9,23E-06	
210Po		2,96E-06	
218At		2,02E-07	
235U	1,10E-02	8,15E+06	8,97E+04
231Th		8,17E+06	
231Pa		2,00E+05	
227Ac		7,22E-03	
227Th		6,03E-03	
223Ra		5,50E-03	
219Rn		5,50E-03	
215Po		5,50E-03	
211Pb		5,50E-03	
211Bi		5,50E-03	
207Tl		5,48E-03	
211Po		1,54E-05	
223Fr		9,96E-05	
236U		1,80E+03	
238U	1,10E-02	1,80E+08	1,98E+06
234Th		1,80E+08	
234Pa(m)		1,80E+08	
234Pa		2,82E+03	
238Pu	6,28E+00	1,80E+02	1,13E+03
239+240Pu	6,28E+00	2,65E+03	1,67E+04
237Np		1,80E+02	
106Ru+Rh		3,60E+02	
99Tc		2,02E+04	
90Sr		8,72E+05	
241Am	2,69E+01	1,80E+02	4,85E+03
Total Act.		7,47E+08	4,22E+06
Total Act. RN avec FC		3,75E+08	



ANALYSE COMPAREE DU BILAN ENVIRONNEMENTAL
D'UN CYCLE ELECTRONUCLEAIRE « MONORECYCLAGE PU »
ET D'UN CYCLE OUVERT

Révision : 0

Taux Act.renseigné	50,5%		Taux Act.renseigné	50,2%	
Impact estimé (Bq)		6,07E+08	Impact estimé (Bq)		8,40E+06
Impact estimé (MBq)		6,07E+02	Impact estimé (MBq)		8,40E+00

Conversion Pierrelatte

Rejets gazeux

Radio-nucléides	FC (Bq C14 eq/Bq)	Activité (Bq/an)	Ionizing radiation (Bq C14 eq)
H-3	6,67E-05		
C-14	1		
Am-241			
Bi-212			
Ce-144+Pr-144			
Cs-137+Ba-137m	6,19E-02		
Nb-95			
Np-237			
Pa-233		2,15E+04	
Pa-234			
Pb-212		4,23E+07	
Pu-238	3,19E-01		
Pu-239	3,95E-01	6,41E+03	2,53E+03
Ra-224		6,23E+03	
Ru-103			
Ru-106+Rh-106			
Sb-125		1,09E+06	
Sr-90			
Tc-99			
Th-228		2,91E+06	
Th-231		1,34E+05	
Th-234		1,97E+06	
Tl-208		4,23E+07	
U-232			
U-234	4,62E-01	1,48E+05	6,84E+04
U-235	1,00E-01	1,62E+07	1,62E+06
U-236		6,74E+05	
U-238	3,90E-02	1,37E+04	5,34E+02
Zr-95		1,43E+07	
Total Act.		1,22E+08	1,69E+06
Total Act. RN avec FC		1,63E+07	
Taux Act. renseigné		13,4%	
Impact estimé (Bq)			1,26E+07
Impact estimé (MBq)			1,26E+01

Rejets liquides

Radio-nucléides	FC (Bq C14 eq/Bq)	Activité (Bq/an)	Ionizing radiation (Bq C14 eq)
H-3	2,14E-06	3,36E+07	7,19E+01
C-14	1	2,84E+08	2,84E+08
Bi-212			
Ce-144+Pr-144			
Cs-137+Ba-137m			
I-129	8,46E+01		
Nb-95			
Np-237		7,00E+06	
Pa-233			
Pa-234		3,38E+08	
Pb-212			
Pu-238	6,28E+00	7,00E+06	4,40E+07
Pu-239	6,28E+00	7,00E+06	4,40E+07
Ra-224			
Ru-103			
Ru-106+Rh-106	3,78E-04		
Sb-125			
Tc-99		1,85E+08	
Th-228			
Th-231		1,62E+07	
Th-234		3,38E+08	
Tl-208			
U-232			
U-234	1,14E-02	3,85E+08	4,39E+06
U-235	1,10E-02	1,62E+07	1,78E+05
U-236		1,02E+07	
U-238	1,10E-02	3,38E+08	3,72E+06
Zr-95			
Total Act.		1,97E+09	3,80E+08
Total Act. RN avec FC		1,08E+09	
Taux Act. renseigné		55,0%	
Impact estimé (Bq)			6,91E+08
Impact estimé (MBq)			6,91E+02

GBII
Rejets gazeux

Radio-nucléides	FC (Bq C14 eq/Bq)	Activité (Bq/an)	Ionizing radiation (Bq C14 eq)
H-3	6,67E-05		
C-14	1		
Am-241			
Bi-212			
Ce-144+Pr-144			
Cs-137+Ba-137m	6,19E-02		
Nb-95			
Np-237			
Pa-233			
Pa-234			
Pb-212		1,14E+04	
Pu-238	3,19E-01		
Pu-239	3,95E-01		
Ra-224			
Ru-103			
Ru-106+Rh-106			
Sb-125			
Sr-90			
Tc-99			
Th-228			
Th-231			
Th-234		8,25E+02	
Tl-208		1,14E+04	
U-232			
U-234	4,62E-01		
U-235	1,00E-01	2,02E+04	2,02E+03
U-236		8,25E+02	
U-238	3,90E-02		
Zr-95		1,14E+04	
Total Act.		5,59E+04	2,02E+03
Total Act. RN avec FC		2,02E+04	
Taux Act.renseigné		36,1%	
Impact estimé (Bq)			5,59E+03
Impact estimé (MBq)			5,59E-03

SOCATRI
Rejets gazeux

Radio-nucléides	FC (Bq C14 eq/Bq)	Activité (Bq/an)	Ionizing radiation (Bq C14 eq)
H-3	6,67E-05	5,18E+08	3,46E+04
C-14	1	7,57E+08	7,57E+08
Am-241		1,29E+03	
Bi-212			
Ce-144+Pr-144		3,88E+04	
Cs-137+Ba-137m	6,19E-02	1,36E+04	8,42E+02
Nb-95		1,12E+04	
Np-237		1,76E+04	
Pa-233			
Pa-234		1,32E+05	
Pb-212			
Pu-238	3,19E-01	3,23E+02	1,03E+02
Pu-239	3,95E-01	1,06E+03	4,19E+02
Ra-224			
Ru-103		9,56E+03	
Ru-106+Rh-106		1,02E+05	
Sb-125		2,57E+04	
Sr-90		7,94E+03	
Tc-99		1,90E+04	
Th-228		5,98E+04	
Th-231		1,41E+05	
Th-234		1,32E+05	
Tl-208			
U-232		6,25E+02	
U-234	4,62E-01	1,05E+04	4,85E+03
U-235	1,00E-01	8,22E+02	8,22E+01
U-236		4,05E+02	
U-238	3,90E-02	1,29E+04	5,03E+02
Zr-95		1,97E+04	
Total Act.		1,28E+09	7,57E+08
Total Act. RN avec FC		1,28E+09	
Taux Act.renseigné		99,9%	
Impact estimé (Bq)			7,57E+08
Impact estimé (MBq)			7,57E+02

Rejets liquides

Radio-nucléides	FC (Bq C14 eq/Bq)	Activité (Bq/an)	Ionizing radiation (Bq C14 eq)
H-3	2,14E-06		
C-14	1		
Bi-212			
Ce-144+Pr-144			
Cs-137+Ba-137m			
I-129	8,46E+01		
Nb-95			
Np-237			
Pa-233			
Pa-234		7,04E+07	
Pb-212			
Pu-238	6,28E+00		
Pu-239	6,28E+00		
Ra-224			
Ru-103			
Ru-106+Rh-106	3,78E-04		
Sb-125			
Tc-99			
Th-228			
Th-231		4,57E+06	
Th-234		7,04E+07	
Tl-208			
U-232			
U-234	1,14E-02	1,08E+08	1,23E+06
U-235	1,10E-02	4,57E+06	5,03E+04
U-236			
U-238	1,10E-02	7,04E+07	7,74E+05
Zr-95			
Total Act.		3,28E+08	2,06E+06
Total Act. RN avec FC		1,83E+08	
Taux Act.renseigné		55,7%	
Impact estimé (Bq)			3,69E+06
Impact estimé (MBq)			3,69E+00

W
Rejets gazeux

Radio-nucléides	FC (Bq C14 eq/Bq)	Activité (Bq/an)	Ionizing radiation (Bq C14 eq)
H-3	6,67E-05		
C-14	1		
Am-241			
Bi-212		9,53E+02	
Ce-144+Pr-144			
Cs-137+Ba-137m	6,19E-02		
Nb-95			
Np-237			
Pa-233		3,73E+03	
Pa-234		6,47E+03	
Pb-212		9,53E+02	
Pu-238	3,19E-01	2,43E+04	7,74E+03
Pu-239	3,95E-01		
Ra-224		9,53E+02	
Ru-103			
Ru-106+Rh-106			
Sb-125			
Sr-90			
Tc-99			
Th-228		9,53E+02	
Th-231		3,67E+02	
Th-234		6,47E+03	
Tl-208			
U-232			
U-234	4,62E-01	2,51E+04	1,16E+04
U-235	1,00E-01	3,67E+02	3,67E+01
U-236			
U-238	3,90E-02	6,47E+03	2,52E+02
Zr-95			
Total Act.		7,71E+04	1,96E+04
Total Act. RN avec FC		5,62E+04	
Taux Act. renseigné		73%	
Impact estimé (Bq)			2,69E+04
Impact estimé (MBq)			2,69E-02

Rejets liquides

Radionucléides	FC (Bq C14 eq/Bq)	Activité (Bq/an)	Ionizing radiation (Bq C14 eq)
H-3	2,14E-06		
C-14	1		
Bi-212		1,26E+06	
Ce-144+Pr-144			
Cs-137+Ba-137m			
I-129	8,46E+01		
Nb-95			
Np-237			
Pa-233		3,20E+07	
Pa-234		8,54E+06	
Pb-212		1,26E+06	
Pu-238	6,28E+00		
Pu-239	6,28E+00		
Ra-224		1,26E+06	
Ru-103			
Ru-106+Rh-106	3,78E-04		
Sb-125			
Tc-99			
Th-228		1,26E+06	
Th-231		4,85E+05	
Th-234		8,54E+06	
Tl-208			
U-232			
U-234	1,14E-02	3,31E+07	3,78E+05
U-235	1,10E-02	4,85E+05	5,34E+03
U-236			
U-238	1,10E-02	8,54E+06	9,39E+04
Zr-95			
Total Act.		9,67E+07	4,77E+05
Total Act. RN avec FC		4,22E+07	
Taux Act. renseigné		43,6%	
Impact estimé (Bq)			1,09E+06
Impact estimé (MBq)			1,09E+00

Romans
Rejets gazeux

Radio-nucléides	FC (Bq C14 eq/Bq)	Activité (Bq/an)	Ionizing radiation (Bq C14 eq)
Sr-90+Y-90			
Bi-212		1,43E+04	
Ce-144+Pr-144		5,24E+05	
Cs-137+Ba-137m	6,19E-02	1,45E+05	8,98E+03
Nb-95		6,20E+04	
Np-237		6,62E+03	
Pa-234		5,39E+03	
Pb-212		1,43E+04	
Pu-239	3,95E-01	6,56E+05	2,59E+05
Ra-224		1,43E+04	
Ru-106+Rh-106		1,20E+06	
Tc-99		1,98E+05	
Th-228		1,43E+04	
Th-231		1,43E+03	
Th-234		5,39E+03	
Tl-208		5,16E+03	
U-232		1,58E+04	
U-234	4,62E-01	5,54E+04	2,56E+04
U-235	1,00E-01	1,43E+03	1,43E+02
U-236		9,42E+02	
U-238	3,90E-02	5,39E+03	2,10E+02
Zr-95		1,28E+05	
Total Act.		3,07E+06	2,94E+05
Total Act. RN avec FC		8,63E+05	
Taux Act. renseigné		28,1%	
Impact estimé (Bq)			1,05E+06
Impact estimé (MBq)			1,05E+00

Rejets liquides

Radio-nucléides	FC (Bq C14 eq/Bq)	Activité (Bq/an)	Ionizing radiation (Bq C14 eq)
Sr-90+Y-90		1,88E+05	
Bi-212		1,28E+05	
Ce-144+Pr-144		5,53E+05	
Cs-137+Ba-137m	8,10E-01	1,40E+05	1,13E+05
Nb-95		5,45E+04	
Np-237		9,11E+04	
Pa-234		6,40E+06	
Pb-212		1,28E+05	
Pu-239	6,28E+00	5,81E+04	3,65E+05
Ra-224		1,28E+05	
Ru-106+Rh-106	1,22E-01	9,54E+05	1,16E+05
Tc-99		1,33E+07	
Th-228		1,28E+05	
Th-231		2,20E+06	
Th-234		6,40E+06	
Tl-208		4,60E+04	
U-232		1,41E+05	
U-234	1,14E-02	6,10E+07	6,95E+05
U-235	1,10E-02	2,20E+06	2,42E+04
U-236		8,10E+05	
U-238	1,10E-02	6,40E+06	7,04E+04
Zr-95		1,14E+05	
Total Act.		1,02E+08	1,38E+06
Total Act. RN avec FC		7,08E+07	
Taux Act. renseigné		69,7%	
Impact estimé (Bq)			1,99E+06
Impact estimé (MBq)			1,99E+00

Réacteurs EDF
Rejets gazeux

900 MW				1300 MW		
Radio-nucléides	FC (Bq C14 eq/Bq)	Activité (MBq/an)	Ionizing radiation (MBq C14 eq)	Radio-nucléides	Activité (MBq/an)	Ionizing radiation (MBq C14 eq)
3H	6,67E-05	3,50E+05	2,33E+01	3H	6,10E+05	4,07E+01
14C	1	1,50E+05	1,50E+05	14C	2,10E+05	2,10E+05
85Kr	6,67E-07	7,48E+03	4,99E-03	85Kr	3,47E+03	2,31E-03
133Xe	6,67E-07	1,97E+05	1,31E-01	133Xe	2,45E+05	1,63E-01
85mKr	6,67E-07	2,49	1,66E-06	85mKr	6,50E+02	4,34E-04
133mXe	6,67E-07	1,86	1,24E-06	133mXe	1,56E+00	1,04E-06
131I	7,62E-04	4,75E+00	3,62E-03	131I	5,05E+00	3,85E-03
133I	4,48E-05	4,48E+00	2,01E-04	133I	1,43E+01	6,41E-04
58Co	2,05E-03	4,33E-01	8,88E-04	58Co	6,87E-01	1,41E-03
60Co	7,62E-02	3,51E-01	2,67E-02	60Co	5,33E-01	4,06E-02
134Cs	5,71E-02	2,54E-01	1,45E-02	134Cs	3,09E-01	1,76E-02
137Cs	6,19E+02	2,69E-01	1,67E+02	137Cs	3,65E-01	2,26E+02
135Xe		5,30E+04		135Xe	7,17E+04	
131mXe		1,76E+04		131mXe	3,83E+02	
88Kr				88Kr	5,45E-02	
127Xe		7,44E-04		127Xe		
51Cr				51Cr	7,01E-02	
82Br		4,15E-03		82Br		
110mAg				110mAg	7,06E-03	
203Hg				203Hg	1,49E-03	
75Se				75Se	4,96E-03	
57Co				57Co	7,30E-04	
124Sb				124Sb	1,09E-03	
76As				76As		
95Nb				95Nb	3,88E-03	
123mTe				123mTe	1,21E-02	
Total Act		7,75E+05	1,50E+05	Total Act	1,14E+06	2,10E+05
Total Act. RN avec FC		7,04E+05		Total Act. RN avec FC	1,07E+06	
Taux Act. renseigné		90,9%		Taux Act. renseigné	93,7%	
Impact estimé (MBq)			1,65E+05	Impact estimé (MBq)		2,24E+05

Rejets gazeux

1450 MW

Radio-nucléides	Activité (MBq/an)	Ionizing radiation (MBq C14 eq)
3H	6,30E+05	4,20E+01
14C	1,40E+05	1,40E+05
85Kr	1,71E+05	1,14E-01
133Xe	1,48E+05	9,87E-02
85mKr		
133mXe	1,80E-01	1,20E-07
131I	9,57E+00	7,29E-03
133I	1,12E+01	5,02E-04
58Co	2,59E-01	5,31E-04
60Co	4,55E-01	3,47E-02
134Cs	2,19E-01	1,25E-02
137Cs	2,65E-01	1,64E+02
135Xe	5,98E+04	
131mXe	5,52E+03	
88Kr		
127Xe		
51Cr		
82Br		
110mAg	1,14E-01	
203Hg		
75Se	6,00E-03	
57Co		
124Sb		
76As		
95Nb		
123mTe		
Total Act	1,15E+06	1,40E+05
Total Act. RN avec FC	1,09E+06	
Taux Act.renseigné	94,3%	
Impact estimé (MBq)		1,49E+05

Rejets liquides

900 MW				1300 MW		
Radio-nucléides	FC (Bq C14 eq/Bq)	Activité (MBq/an)	Ionizing radiation (MBq C14 eq)	Radio-nucléides	Activité (MBq/an)	Ionizing radiation (MBq C14 eq)
3H	2,14E-06	1,03E+07	2,20E+01	3H	2,65E+07	5,67E+01
14C	1	9,80E+03	9,80E+03	14C	1,26E+04	1,26E+04
54Mn	1,48E-03	7,56E+00	1,12E-02	54Mn	5,95E+00	8,81E-03
58Co	1,95E-04	3,10E+01	6,04E-03	58Co	4,83E+01	9,42E-03
60Co	2,10E-01	6,92E+01	1,45E+01	60Co	5,17E+01	1,09E+01
131I	2,38E-03	4,59E+00	1,09E-02	131I	4,65E+00	1,11E-02
134Cs	6,67E-01	5,26E+00	3,51E+00	134Cs	4,75E+00	3,17E+00
137Cs	8,10E-01	6,32E+00	5,12E+00	137Cs	1,06E+01	8,55E+00
63Ni		3,05E+01		63Ni	8,41E+01	
123mTe		6,06E+00		123mTe	9,10E+00	
124Sb		8,94E+00		124Sb	6,90E+00	
125Sb		1,62E+01		125Sb	1,61E+01	
110mAg		5,65E+01		110mAg	6,60E+00	
Total Act		1,03E+07	9,85E+03	Total Act	2,65E+07	1,27E+04
Total Act. RN avec FC		1,03E+07		Total Act. RN avec FC	2,65E+07	
Taux Act. renseigné		100,0%		Taux Act. renseigné	100,0%	
Impact estimé (MBq)			9,85E+03	Impact estimé (MBq)		1,27E+04

Rejets liquides

1450 MW

Radio-nucléides	Activité (MBq/an)	Ionizing radiation (MBq C14 eq)
3H	3,40E+07	7,28E+01
14C	2,04E+04	2,04E+04
54Mn	5,50E+00	8,14E-03
58Co	1,05E+01	2,05E-03
60Co	5,83E+01	1,22E+01
131I	4,25E+00	1,01E-02
134Cs	7,00E+00	4,67E+00
137Cs	8,75E+00	7,09E+00
63Ni	2,88E+01	
123mTe	5,00E+00	
124Sb	4,75E+00	
125Sb	1,18E+01	
110mAg	2,15E+01	
Total Act	3,40E+07	2,05E+04
Total Act. RN avec FC	3,40E+07	
Taux Act.renseigné	100,0%	
Impact estimé (MBq)		2,05E+04

La Hague

Rejets gazeux

Radio-nucléides	FC (Bq C14 eq/Bq)	Activité (MBq/an)	Ionizing radiation (MBq C14 eq)
3H	6,67E-05	7,45E+07	4,97E+03
14C	1	1,91E+07	1,91E+07
85Kr	6,67E-07	3,20E+11	2,13E+05
60Co	7,62E-02	5,35E+00	4,08E-01
106RuRh		6,65E+01	
125Sb		2,52E+01	
129I	4,48	5,85E+03	2,62E+04
131I	7,62E-04	3,69E+02	2,81E-01
133I	4,48E-05	1,96E+02	8,78E-03
134Cs	5,71E-02	3,80E+00	2,17E-01
137Cs+137mBa	6,19E-02	3,84E+00	2,38E-01
241Pu	3,95E-01	4,95E-01	1,96E-01
238Pu	3,19E-01	5,64E-03	1,80E-03
239/240Pu	3,95E-01	4,62E-03	1,82E-03
Total Act		3,20E+11	1,93E+07
Total Act. RN avec FC		3,20E+11	
Taux Act. renseigné		100,0%	
Impact estimé (MBq)			1,93E+07

Rejets liquides

Radio-nucléides	FC (Bq C14 eq/Bq)	Activité (MBq/an)	Ionizing radiation (MBq C14 eq)
3H	2,14E-06	1,23E+10	2,63E+04
14C	1	7,55E+06	7,55E+06
54Mn	1,48E-03	2,39E+03	3,54E+00
57Co		5,85E+01	
58Co	1,95E-04	4,97E+02	9,69E-02
60Co	2,10E-01	5,80E+04	1,22E+04
63Ni	9,94E-02	1,06E+04	1,05E+03
65Zn		1,03E+02	
90SrY		1,94E+05	
99Tc		3,18E+04	
106RuRh		2,74E+06	
125Sb		4,86E+04	
129I	4,75E-01	1,42E+06	6,75E+05
131I	2,38E-03	1,52E+04	3,62E+01
133I	2,38E-08	5,16E+03	
134Cs	6,67E-01	5,03E+04	3,36E+04
137CsBa	8,10E-01	6,59E+05	5,33E+05
144CePr		1,34E+01	
154Eu		3,00E+02	
233U		2,42E-02	
234U	1,14E-02	6,33E+02	7,22E+00
235U	1,10E-02	9,25E+00	1,02E-01
236U		1,70E+02	
238U	1,10E-02	2,00E+02	2,20E+00
238Pu		5,68E+03	
239/240Pu		1,42E+03	
241Pu		1,19E+05	
241Am		2,29E+03	
242Cm		9,11E+00	
244Cm		1,32E+03	
Total Act		1,23E+10	8,83E+06
Total Act. RN avec FC		1,23E+10	
Taux Act. renseigné		100,0%	
Impact estimé (MBq)			8,83E+06

TU5
Rejets gazeux

Radio-nucléides	FC (Bq C14 eq/Bq)	Activité (Bq/an)	Ionizing radiation (Bq C14 eq)
H-3	6,67E-05	3,33E+08	2,22E+04
C-14	1	6,80E+08	6,80E+08
Am-241			
Bi-212		1,43E+03	
Ce-144+Pr-144		2,80E+04	
Cs-137+Ba-137m	6,19E-02	2,80E+03	1,73E+02
Nb-95		2,80E+03	
Np-237		4,48E+03	
Pa-233		5,59E+03	
Pa-234		9,70E+03	
Pb-212		1,43E+03	
Pu-238	3,19E-01	3,64E+04	1,16E+04
Pu-239	3,95E-01	3,64E+04	1,44E+04
Ra-224		1,43E+03	
Ru-103		2,80E+03	
Ru-106+Rh-106		5,59E+04	
Sb-125		8,39E+03	
Sr-90			
Tc-99		1,68E+05	
Th-228		1,43E+03	
Th-231		5,51E+02	
Th-234		9,70E+03	
Tl-208		5,16E+02	
U-232		1,58E+03	
U-234	4,62E-01	3,77E+04	1,74E+04
U-235	1,00E-01	5,51E+02	5,51E+01
U-236		9,78E+03	
U-238	3,90E-02	9,70E+03	3,78E+02
Zr-95		5,59E+03	
Total Act.		1,01E+09	6,80E+08
Total Act. RN avec FC		1,01E+09	
Taux Act. renseigné		100%	
Impact estimé (Bq)			6,80E+08
Impact estimé (MBq)			6,80E+02

Rejets liquides

Radio-nucléides	FC (Bq C14 eq/Bq)	Activité (Bq/an)	Ionizing radiation (Bq C14 eq)
H-3	2,14E-06	2,17E+08	4,64E+02
C-14	1	5,00E+07	5,00E+07
Bi-212		5,41E+05	
Ce-144+Pr-144		1,64E+07	
Cs-137+Ba-137m		5,46E+06	
I-129	8,46E+01		
Nb-95		5,46E+06	
Np-237		2,31E+06	
Pa-233		1,37E+07	
Pa-234		3,66E+06	
Pb-212		5,41E+05	
Pu-238	6,28E+00		
Pu-239	6,28E+00	8,37E+06	5,26E+07
Ra-224		5,41E+05	
Ru-103		2,73E+06	
Ru-106+Rh-106	3,78E-04	2,84E+07	1,07E+04
Sb-125		5,46E+06	
Tc-99			
Th-228		5,41E+05	
Th-231		2,08E+05	
Th-234		3,66E+06	
Tl-208		1,95E+05	
U-232		5,95E+05	
U-234	1,14E-02	1,42E+07	1,62E+05
U-235	1,10E-02	2,08E+05	2,29E+03
U-236		3,69E+06	
U-238	1,10E-02	3,66E+06	4,03E+04
Zr-95		5,46E+06	
Total Act.		3,93E+08	1,03E+08
Total Act. RN avec FC		3,31E+08	
Taux Act. renseigné		84,2%	
Impact estimé (Bq)			1,22E+08
Impact estimé (MBq)			1,22E+02

Mélox
Rejets gazeux

Radio-nucléides	FC (Bq C14 eq/Bq)	Activité (Bq/an)	Ionizing radiation (Bq C14 eq)
238 Pu	3,19E-01	7,89E+03	2,52E+03
239 Pu	3,19E-01	6,02E+02	1,92E+02
240 Pu	3,19E-01	1,03E+03	3,28E+02
241 Pu	3,19E-01	1,49E+05	4,75E+04
242 Pu	3,19E-01	5,19E+00	1,66E+00
241 Am		4,89E+02	0,00E+00
235 U	1,00E-01	2,17E+02	2,17E+01
238 U	3,90E-02	1,68E+04	6,55E+02
234U	4,62E-01	2,49E+03	1,15E+03
Total Act. Total Act. RN avec FC Taux Act.renseigné		1,78E+05 1,78E+05 100%	5,24E+04
Impact estimé (Bq)			5,25E+04
Impact estimé (MBq)			5,25E-02

Rejets liquides

Radio-nucléides	FC (Bq C14 eq/Bq)	Activité (Bq/an)	Ionizing radiation (Bq C14 eq)
238 Pu	6,28E+00	1,10E+05	6,90E+05
239 Pu	6,28E+00	8,40E+03	5,28E+04
240 Pu	6,28E+00	1,44E+04	9,02E+04
241 Pu	2,69E+01	2,03E+06	5,47E+07
242 Pu		7,28E+01	0,00E+00
241 Am	2,69E+01	6,81E+03	1,84E+05
235 U	1,10E-02	1,40E-02	1,54E-04
238 U	1,10E-02	8,68E-01	9,55E-03
234U	1,14E-02		
Total Act. Total Act. RN avec FC Taux Act.renseigné		2,17E+06 2,17E+06 100,0%	5,57E+07
Impact estimé (Bq)			5,57E+07
Impact estimé (MBq)			5,57E+01

Stockage ANDRA TFA (CIRES) - Morvilliers

Rejets
gazeux

Radio-nucléides	FC (Bq C14 eq/Bq)	Activité (MBq/an)	Ionizing radiation (MBq C14 eq)
3H	6,67E-05	56,6	3,78E-03
C14	1,00E+00	31,7	3,17E+01
129I	4,48E+00	2,57E-03	1,15E-02
131I	7,62E-04	4,92E-03	3,75E-06
125I		1,60E-03	0,00E+00
134Cs	5,71E-02	7,46E-05	4,26E-06
137Cs	6,19E-02	7,14E-05	4,42E-06
60Co	7,62E-02	8,41E-05	6,41E-06
238U	3,90E-02	1,64E-04	6,40E-06
234U	4,62E-01	1,80E-04	8,32E-05
239Pu	3,95E-01	2,13E-04	8,41E-05
240Pu	3,95E-01	2,62E-04	1,03E-04
238Pu	3,19E-01	1,10E-04	3,51E-05
241Am		1,80E-04	0,00E+00
Total Act		8,83E+01	3,17E+01
Total Act. RN avec FC		8,83E+01	
Taux Act. Renseigné		100%	
Impact estimé (MBq)			3,17E+01

Stockage ANDRA FMA-VC de l'Aube (Soulaines)

Rejets gazeux

Radio-nucléides	FC (Bq C14 eq/Bq)	Activité (MBq/an)	Ionizing radiation (MBq C14 eq)
3H	6,67E-05	1,03E+02	6,87E-03
C14	1,00E+00	5,32E+01	5,32E+01
129I	4,48E+00	2,29E-02	1,03E-01
131I	7,62E-04	2,98E-02	2,27E-05
125I		1,35E-02	
134Cs	5,71E-02	4,70E-03	2,68E-04
137Cs	6,19E-02	4,50E-03	2,79E-04
60Co	7,62E-02	5,30E-03	4,04E-04
238U	3,90E-02	1,00E-04	3,90E-06
234U	4,62E-01	1,10E-04	5,08E-05
239Pu	3,95E-01	1,30E-04	5,14E-05
240Pu	3,95E-01	1,60E-04	6,32E-05
238Pu	3,19E-01	6,70E-05	2,14E-05
241Am		1,10E-04	
Total Act		1,56E+02	5,33E+01
Total Act. RN avec FC		1,56E+02	
Taux Act. Renseigné		100%	
Impact estimé (MBq)			5,33E+01

Rejets liquides

Radio-nucléides	FC (Bq C14 eq/Bq)	Activité (MBq/an)	Ionizing radiation (MBq C14 eq)
3H	2,14E-06	3,37E-01	7,21E-07
C14	1	2,16E-01	2,16E-01
134Cs	6,67E-01	3,74E+02	2,49E+02
137Cs	8,10E-01	4,06E-02	3,29E-02
60Co	2,10E-01	4,18E-02	8,78E-03
238U	1,10E-02	3,67E-04	4,04E-06
234U	1,14E-02	3,70E-04	4,22E-06
239Pu	1,95E-02	7,11E-04	1,39E-05
240Pu	1,95E-02	8,53E-04	1,66E-05
238Pu	1,95E-02	1,80E-04	3,51E-06
241Am		6,00E-04	
Total Act		3,75E+02	2,50E+02
Total Act. RN avec FC		3,75E+02	
Taux Act. pris en compte		100%	
Impact estimé (MBq)			2,50E+02

8.6 Annexe 6 : Estimation des données de construction et de fonctionnement d'une piscine d'entreposage des combustibles usés

La construction d'une piscine a été évaluée avec les données ci-dessous :

Hauteur du bâtiment (m)	25
Hauteur piscine H (m)	15
Longueur piscine L (m)	80
Largeur piscine l (m)	23
Rapport surface bâtiment/piscine	1,2
Epaisseur béton (m), 5 côtés + toiture	1
Béton (m ³)	7168
Acier pour un dosage à 200 kg/m ³ de béton (t)	1534
Electricité France (MWh)	20 000

En bleu : hypothèse CEA

Les données fournies par Orano sont les suivantes pour le fonctionnement d'une piscine :

Energie (MWh/an)	4771
Eau (m ³ /an)	4000

L'usine de La Hague a fourni un inventaire des résines, destinées à épurer l'eau des piscines des radioéléments (Co60 et Sb125 essentiellement) de 2013 à mi-2018 pour les ateliers T0 et ACR (atelier de conditionnement des résines) [fichier « REX piscines VL »], à 68 m³/an. Elles sont enrobées et les déchets cimentés obtenus sont conditionnés en colis CBF-C'2.

Le retour d'expérience semble montrer que si l'essentiel des résines sont de nature FMA-VC, donc destinées au CSA, une petite proportion reçoit à T0 l'eau davantage contaminée au niveau du déchargement de combustibles, dont certains sont « ruptés » (gaines légèrement fissurées) ; les résines entrent alors dans la catégorie MA-VL qui devra être stockée à Cigéo.

Les deux types de résines usées ont été pris en compte dans la modélisation.

Le tableau suivant regroupe les données nécessaires pour les calculs des volumes de déchets.

Nombre de colis de résines usées	Nombre de fûts ACR	Période considérée (ans)	Nombre annuel de colis de T0 (MA-VL)	Nombre annuel de fûts ACR (FMA-VC)	Flux de CU à décharger (tML/an)	Volume unitaire CBF-C'2 (m ³)
11	306	5,5	2,0	55,6	1200	1,18

On obtient alors les volumes annuels de déchets de production.

Volume unitaire de colis MA-VL (m ³ /tML)	Volume unitaire de colis FMA-VC (m ³ /tML)	Volume de colis MA-VL (m ³ /an)	Volume de colis FMA-VC (m ³ /an)
1,97E-03	5,47E-02	2,36	65,65

8.7 Annexe 7 : Résultats des calculs d'impact

Ecart relatif = (valeur (cycle ouvert) – valeur (cycle actuel))/valeur (cycle actuel)

Catégories IMPACT2002+, sans rejets potentiels des mines :

		Total cycle actuel	Total cycle ouvert	Ecart relatif
Aquatic ecotoxicity	t TEG/MWh	4,033E-01	3,772E-01	-6,5%
Global Warming	tCO2/MWh	3,723E-03	3,718E-03	-0,1%
Carcinogens	t C2H3Cl/MWh	5,979E-05	6,141E-05	2,7%
Non carcinogens	t C2H3Cl/MWh	5,867E-05	5,774E-05	-1,6%
Ozone layer depletion	t CFC-11/MWh	1,387E-08	1,03E-08	-25,7%
Aquatic acidification	tSO2/MWh	5,546E-05	5,850E-05	5,5%
Aquatic eutrophication	tPO4/MWh	1,240E-06	1,297E-06	4,5%
Terrestrial acidification	tSO2/MWh	1,378E-04	1,459E-04	5,8%
Ionizing radiation	MBq/MWh	1,914E-01	1,386E-01	-27,6%

Catégories IMPACT2002+, avec rejets potentiels des mines :

		Total cycle actuel	Total cycle ouvert	Ecart relatif
Aquatic ecotoxicity	t TEG/MWh	4,912E-01	4,752E-01	-3,3%
Global Warming	tCO2/MWh	3,723E-03	3,718E-03	-0,1%
Carcinogens	t C2H3Cl/MWh	5,979E-05	6,141E-05	2,7%
Non carcinogens	t C2H3Cl/MWh	5,871E-05	5,778E-05	-1,6%
Ozone layer depletion	t CFC-11/MWh	1,387E-08	1,030E-08	-25,7%
Aquatic acidification	tSO2/MWh	5,546E-05	5,850E-05	5,5%
Aquatic eutrophication	tPO4/MWh	1,240E-06	1,297E-06	4,5%
Terrestrial acidification	tSO2/MWh	1,378E-04	1,459E-04	5,8%
Ionizing radiation	MBq/MWh	1,914E-01	1,386E-01	-27,6%

Volumes des différentes catégories de déchets :

Type de déchets	Unité	Cycle actuel	Cycle ouvert	Ecart relatif
Conventionnels	t/MWh	2,41E-05	1,82E-05	-24%
Miniers	m3/MWh	2,68E-03	2,99E-03	11%
TFA	m3/MWh	5,09E-05	4,56E-05	-10%
FMA-VC	m3/MWh	2,54E-05	2,13E-05	-16%
FA-VL	m3/MWh	1,46E-05	1,43E-05	-2,0%
MA-VL	m3/MWh	1,67E-06	5,63E-07	-66%
HA	m3/MWh	5,87E-07	2,25E-06	283%
MA-VL + HA		2,26E-06	2,81E-06	24%

densité des résidus miniers : 1,8

Autres indicateurs analysés :

Indicateur	Unité	Cycle actuel	Cycle ouvert	Ecart relatif
Eau utilisée	m3/MWh	1,475	1,480	0,3%
Emission de poussières	t/MWh	5,693E-08	6,150E-08	8,0%
Surface des usines	ha/MWh	2,057E-05	2,188E-05	6,4%
Ressources en uranium	kg U/MWh	2,03E-02	2,26E-02	11,5%
Oxydation photochimique (POCP)	t eq C2H4/MWh	1,883E-06	2,123E-06	12,8%

Résultats des calculs d'impact par usine et par opérations (regroupement de construction + démantèlement, fonctionnement + transports)

Cycle actuel (sans rejets potentiels des mines)

Impact	Unité	Total	Opération	Mine Somaïr	Usine Somaïr	Mine Cominak	Usine Cominak	Mine Katco	Usine Katco	Malvésî	Conversion Pierrelatte	GB II	Socatri	W	Romans
Aquatic ecotoxicity	t TEG/MWh	2,48E-01	cons+dem	7,70E-05	8,68E-04	3,82E-05	8,68E-04	5,22E-05	8,41E-04	5,52E-03	5,58E-03	1,04E-03	2,96E-03	5,09E-04	2,65E-03
Aquatic ecotoxicity	t TEG/MWh	1,55E-01	fonc+tr	3,67E-03	8,37E-03	7,41E-03	2,44E-02	1,34E-03	2,75E-02	9,01E-03	5,25E-03	1,33E-02	8,56E-04	-4,19E-03	5,46E-03
Aquatic acidification	tSO2/MWh	7,57E-06	cons+dem	1,80E-09	1,93E-07	1,25E-09	1,93E-07	2,06E-09	9,03E-08	3,99E-07	4,04E-07	5,97E-08	7,83E-08	2,07E-08	6,74E-08
Aquatic acidification	tSO2/MWh	4,79E-05	fonc+tr	1,15E-06	4,01E-06	2,32E-06	1,30E-05	1,68E-05	4,51E-06	1,01E-06	3,88E-07	1,33E-07	1,74E-08	-5,60E-07	1,54E-07
Aquatic eutrophication	tPO4/MWh	5,25E-07	cons+dem	3,93E-10	2,07E-08	2,41E-10	2,07E-08	3,81E-10	3,77E-09	4,80E-09	5,05E-09	4,13E-09	3,88E-09	4,80E-10	2,50E-09
Aquatic eutrophication	tPO4/MWh	7,15E-07	fonc+tr	7,25E-09	6,80E-08	1,46E-08	4,32E-07	2,64E-09	7,41E-08	1,95E-08	8,39E-09	3,95E-09	3,22E-10	-2,30E-08	5,68E-09
Carcinogens	t C2H3Cl/MWh	2,93E-05	cons+dem	1,44E-08	1,91E-07	1,04E-08	1,91E-07	1,61E-08	1,92E-07	3,65E-07	3,71E-07	1,88E-07	2,47E-07	2,84E-08	1,17E-07
Carcinogens	t C2H3Cl/MWh	3,05E-05	fonc+tr	2,02E-07	4,63E-06	4,07E-07	1,04E-05	7,35E-08	9,98E-06	1,09E-06	4,91E-07	2,42E-07	2,02E-08	-1,60E-06	4,66E-07
Global Warming	tCO2/MWh	1,27E-03	cons+dem	4,08E-07	3,11E-05	2,95E-07	3,11E-05	5,12E-07	1,42E-05	4,57E-05	4,60E-05	6,86E-06	1,19E-05	2,79E-06	9,94E-06
Global Warming	tCO2/MWh	2,45E-03	fonc+tr	1,04E-04	1,19E-04	2,11E-04	6,51E-04	3,80E-05	4,47E-04	2,15E-04	3,48E-05	3,31E-05	2,80E-06	-3,31E-05	5,01E-05
Ionizing radiation	MBq/MWh	2,50E-04	cons+dem	1,54E-09	3,80E-08	1,05E-09	3,80E-08	1,84E-09	2,40E-08	1,11E-05	1,11E-05	3,64E-07	5,69E-06	1,14E-06	5,69E-06
Ionizing radiation	MBq/MWh	1,91E-01	fonc+tr	6,12E-07	2,50E-02	1,24E-06	7,47E-02	2,23E-07	1,01E-04	7,78E-06	1,07E-05	3,60E-05	3,83E-06	1,52E-06	7,65E-06
Non carcinogens	t C2H3Cl/MWh	3,58E-05	cons+dem	1,56E-08	2,04E-07	1,06E-08	2,04E-07	1,70E-08	3,20E-07	3,96E-07	4,05E-07	1,90E-07	2,87E-07	3,99E-08	1,91E-07
Non carcinogens	t C2H3Cl/MWh	2,29E-05	fonc+tr	5,63E-07	2,02E-06	1,14E-06	4,97E-06	2,05E-07	6,47E-06	1,24E-06	6,47E-07	7,36E-07	4,99E-08	-1,39E-06	8,12E-07
Ozone layer depletion	t CFC-11/MWh	4,55E-10	cons+dem	1,63E-14	6,60E-13	1,16E-14	6,60E-13	2,05E-14	5,06E-13	2,32E-11	2,32E-11	9,11E-13	9,35E-12	2,02E-12	9,42E-12
Ozone layer depletion	t CFC-11/MWh	1,34E-08	fonc+tr	1,72E-11	8,60E-11	3,48E-11	2,41E-11	6,28E-12	6,65E-11	8,46E-09	1,82E-11	5,49E-11	3,52E-12	-1,92E-12	1,64E-11
Terrestrial acidification	tSO2/MWh	3,45E-05	cons+dem	6,47E-09	5,96E-07	4,53E-09	5,96E-07	7,67E-09	3,06E-07	2,59E-06	2,60E-06	1,82E-07	3,58E-07	1,24E-07	3,67E-07
Terrestrial acidification	tSO2/MWh	1,03E-04	fonc+tr	2,05E-06	1,36E-05	4,15E-06	4,38E-05	7,49E-07	1,09E-05	5,19E-06	8,23E-07	4,55E-07	6,71E-08	-1,23E-06	5,92E-07

Nota : le total se rapporte à l'ensemble des usines (tableau réparti sur deux pages)



ANALYSE COMPAREE DU BILAN ENVIRONNEMENTAL
D'UN CYCLE ELECTRONUCLEAIRE « MONORECYCLAGE PU »
ET D'UN CYCLE OUVERT

Révision : 0

Impact	Unité	Opération	REP 900 MW	REP 1300 MW	REP 1450 MW	La Hague	TU5	Lingen	Mélox	CIRES	CSA	CIGEO surface	CIGEO CSD-C	CIGEO CSD-V	CIGEO TechCim	CIGEO MOX
Aquatic ecotoxicity	t TEG/MWh	cons+dem	1,21E-01	7,13E-02	1,43E-02	1,53E-02	3,06E-04	2,65E-03	9,37E-04	1,21E-04	1,64E-04	6,04E-04	0	0	0	0
Aquatic ecotoxicity	t TEG/MWh	fonc+tr	5,54E-03	3,26E-03	6,51E-04	3,31E-02	3,21E-04	6,82E-04	2,35E-03	0	8,41E-05	0	9,92E-04	3,22E-03	5,76E-04	2,30E-03
Aquatic acidification	t SO2/MWh	cons+dem	3,27E-06	1,92E-06	3,85E-07	3,27E-07	1,89E-08	6,74E-08	2,99E-08	4,56E-09	6,08E-09	2,58E-08	0	0	0	0
Aquatic acidification	t SO2/MWh	fonc+tr	1,32E-06	7,79E-07	1,56E-07	2,40E-06	-2,59E-09	2,55E-08	8,05E-08	0	6,53E-09	0	3,10E-08	8,40E-08	9,34E-09	6,19E-08
Aquatic eutrophication	t PO4/MWh	cons+dem	2,53E-07	1,49E-07	2,97E-08	1,70E-08	4,25E-10	2,50E-09	1,59E-09	8,58E-10	8,98E-10	4,23E-09	0	0	0	0
Aquatic eutrophication	t PO4/MWh	fonc+tr	2,69E-08	1,59E-08	3,17E-09	3,30E-08	-3,91E-10	9,88E-10	1,36E-09	0	1,67E-10	0	5,67E-09	7,73E-09	8,43E-10	6,88E-09
Carcinogens	t C2H3Cl/MWh	cons+dem	1,48E-05	8,70E-06	1,74E-06	1,63E-06	2,64E-08	1,17E-07	8,55E-08	3,60E-08	3,86E-08	1,81E-07	0	0	0	0
Carcinogens	t C2H3Cl/MWh	fonc+tr	1,01E-06	5,93E-07	1,19E-07	1,31E-06	-8,01E-09	7,67E-08	8,55E-08	0	1,02E-08	0	2,39E-07	3,56E-07	3,88E-08	3,08E-07
Global Warming	t CO2/MWh	cons+dem	5,73E-04	3,37E-04	6,74E-05	6,50E-05	2,40E-06	9,94E-06	4,95E-06	1,08E-06	1,52E-06	6,75E-06	0	0	0	0
Global Warming	t CO2/MWh	fonc+tr	1,37E-04	8,07E-05	1,61E-05	2,81E-04	-3,08E-06	5,99E-06	1,26E-05	0	2,05E-06	0	7,44E-06	2,28E-05	2,23E-06	1,64E-05
Ionizing radiation	MBq/MWh	cons+dem	1,05E-04	6,15E-05	1,23E-05	2,85E-05	5,78E-07	5,69E-06	1,71E-06	1,81E-08	1,04E-07	2,38E-08	0	0	0	0
Ionizing radiation	MBq/MWh	fonc+tr	1,42E-02	1,13E-02	1,62E-03	6,42E-02	3,31E-06	8,56E-07	5,53E-06	7,56E-08	7,31E-07	0	6,70E-07	5,61E-06	1,29E-06	3,58E-06
Non carcinogens	t C2H3Cl/MWh	cons+dem	1,80E-05	1,06E-05	2,12E-06	2,19E-06	3,04E-08	1,91E-07	1,05E-07	3,76E-08	4,41E-08	2,01E-07	0	0	0	0
Non carcinogens	t C2H3Cl/MWh	fonc+tr	5,83E-07	3,43E-07	6,85E-08	2,84E-06	-2,11E-09	1,12E-07	1,91E-07	0	2,77E-08	0	2,58E-07	5,28E-07	6,09E-08	4,16E-07
Ozone layer depletion	t CFC-11/MWh	cons+dem	1,91E-10	1,12E-10	2,24E-11	4,53E-11	1,16E-12	9,42E-12	2,95E-12	6,63E-14	2,14E-13	2,76E-13	0	0	0	0
Ozone layer depletion	t CFC-11/MWh	fonc+tr	2,43E-11	1,43E-11	2,86E-12	4,56E-09	2,23E-12	1,89E-12	9,02E-12	0	7,98E-14	0	1,26E-12	9,24E-12	2,01E-12	5,96E-12
Terrestrial acidification	t SO2/MWh	cons+dem	1,46E-05	8,56E-06	1,71E-06	1,19E-06	1,17E-07	3,67E-07	1,57E-07	1,72E-08	2,42E-08	9,95E-08	0	0	0	0
Terrestrial acidification	t SO2/MWh	fonc+tr	9,06E-06	5,33E-06	1,07E-06	5,66E-06	4,80E-09	8,46E-08	1,97E-07	0	2,69E-08	0	1,13E-07	3,33E-07	3,42E-08	2,41E-07

Cycle ouvert (sans rejets potentiels des mines) 1/2

Nota : le total se rapporte à l'ensemble des usines (tableau réparti sur deux pages)

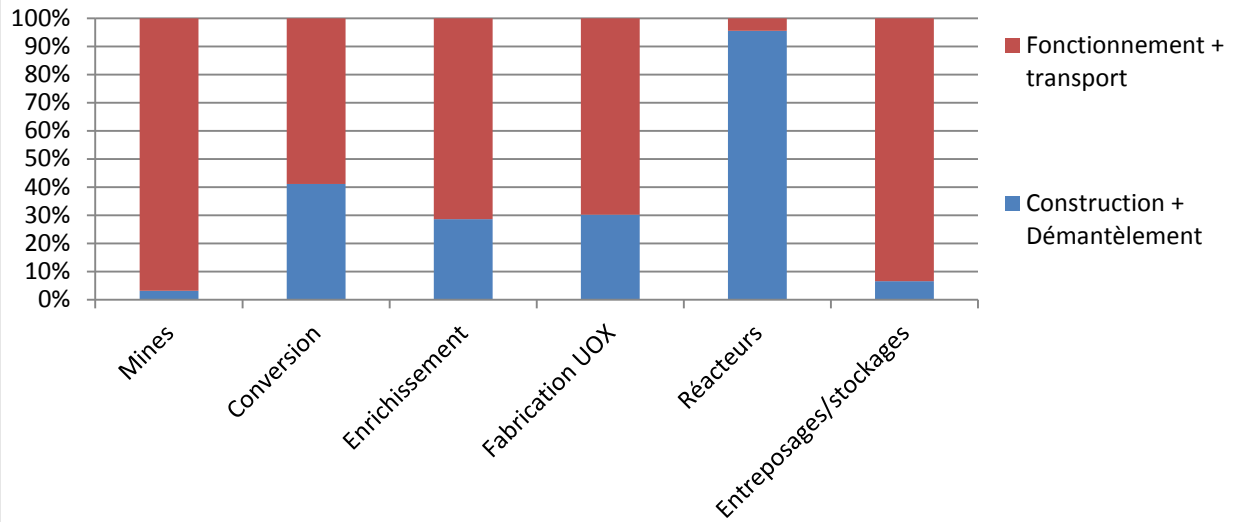
Impact	Unité	Total	Opération	Mine Somaïr	Usine Somaïr	Mine Cominak	Usine Cominak	Mine Katco	Usine Katco	Malvésï	Conversion Pierrelatte	GB II	Socatri	W	Romans
Aquatic ecotoxicity	t TEG/MWh	2,29E-01	cons+dem	7,70E-05	8,68E-04	3,82E-05	8,68E-04	5,22E-05	8,41E-04	5,52E-03	5,58E-03	1,04E-03	2,96E-03	5,09E-04	2,65E-03
Aquatic ecotoxicity	t TEG/MWh	1,48E-01	fonc+tr	4,09E-03	9,33E-03	8,26E-03	2,72E-02	1,49E-03	3,07E-02	1,00E-02	5,85E-03	1,49E-02	9,60E-04	-4,67E-03	6,13E-03
Aquatic acidification	tSO2/MWh	7,14E-06	cons+dem	1,80E-09	1,93E-07	1,25E-09	1,93E-07	2,06E-09	9,03E-08	3,99E-07	4,04E-07	5,97E-08	7,83E-08	2,07E-08	6,74E-08
Aquatic acidification	tSO2/MWh	5,14E-05	fonc+tr	1,28E-06	4,47E-06	2,59E-06	1,45E-05	1,87E-05	5,03E-06	1,13E-06	4,33E-07	1,49E-07	1,95E-08	-6,24E-07	1,72E-07
Aquatic eutrophication	tPO4/MWh	5,06E-07	cons+dem	3,93E-10	2,07E-08	2,41E-10	2,07E-08	3,81E-10	3,77E-09	4,80E-09	5,05E-09	4,13E-09	3,88E-09	4,80E-10	2,50E-09
Aquatic eutrophication	tPO4/MWh	7,91E-07	fonc+tr	8,08E-09	7,58E-08	1,63E-08	4,81E-07	2,95E-09	8,26E-08	2,17E-08	9,36E-09	4,43E-09	3,61E-10	-2,56E-08	6,37E-09
Carcinogens	t C2H3Cl/MWh	2,75E-05	cons+dem	1,44E-08	1,91E-07	1,04E-08	1,91E-07	1,61E-08	1,92E-07	3,65E-07	3,71E-07	1,88E-07	2,47E-07	2,84E-08	1,17E-07
Carcinogens	t C2H3Cl/MWh	3,39E-05	fonc+tr	2,25E-07	5,16E-06	4,54E-07	1,16E-05	8,20E-08	1,11E-05	1,21E-06	5,47E-07	2,72E-07	2,27E-08	-1,78E-06	5,23E-07
Global Warming	tCO2/MWh	1,19E-03	cons+dem	4,08E-07	3,11E-05	2,95E-07	3,11E-05	5,12E-07	1,42E-05	4,57E-05	4,60E-05	6,86E-06	1,19E-05	2,79E-06	9,94E-06
Global Warming	tCO2/MWh	2,53E-03	fonc+tr	1,16E-04	1,32E-04	2,35E-04	7,26E-04	4,24E-05	4,99E-04	2,40E-04	3,88E-05	3,71E-05	3,14E-06	-3,69E-05	5,62E-05
Ionizing radiation	MBq/MWh	2,15E-04	cons+dem	1,54E-09	3,80E-08	1,05E-09	3,80E-08	1,84E-09	2,40E-08	1,11E-05	1,11E-05	3,64E-07	5,69E-06	1,14E-06	5,69E-06
Ionizing radiation	MBq/MWh	1,38E-01	fonc+tr	6,82E-07	2,79E-02	1,38E-06	8,32E-02	2,49E-07	1,12E-04	8,67E-06	1,19E-05	4,04E-05	4,30E-06	1,69E-06	8,59E-06
Non carcinogens	t C2H3Cl/MWh	3,34E-05	cons+dem	1,56E-08	2,04E-07	1,06E-08	2,04E-07	1,70E-08	3,20E-07	3,96E-07	4,05E-07	1,90E-07	2,87E-07	3,99E-08	1,91E-07
Non carcinogens	t C2H3Cl/MWh	2,43E-05	fonc+tr	6,28E-07	2,25E-06	1,27E-06	5,54E-06	2,29E-07	7,22E-06	1,39E-06	7,22E-07	8,25E-07	5,60E-08	-1,55E-06	9,11E-07
Ozone layer depletion	t CFC-11/MWh	3,98E-10	cons+dem	1,63E-14	6,60E-13	1,16E-14	6,60E-13	2,05E-14	5,06E-13	2,32E-11	2,32E-11	9,11E-13	9,35E-12	2,02E-12	9,42E-12
Ozone layer depletion	t CFC-11/MWh	9,90E-09	fonc+tr	1,92E-11	9,59E-11	3,88E-11	2,68E-11	7,00E-12	7,41E-11	9,43E-09	2,03E-11	6,16E-11	3,95E-12	-2,14E-12	1,84E-11
Terrestrial acidification	tSO2/MWh	3,28E-05	cons+dem	6,47E-09	5,96E-07	4,53E-09	5,96E-07	7,67E-09	3,06E-07	2,59E-06	2,60E-06	1,82E-07	3,58E-07	1,24E-07	3,67E-07
Terrestrial acidification	tSO2/MWh	1,13E-04	fonc+tr	2,29E-06	1,52E-05	4,62E-06	4,88E-05	8,35E-07	1,22E-05	5,79E-06	9,18E-07	5,11E-07	7,53E-08	-1,37E-06	6,64E-07

Cycle ouvert (sans rejets potentiels des mines) 2/2

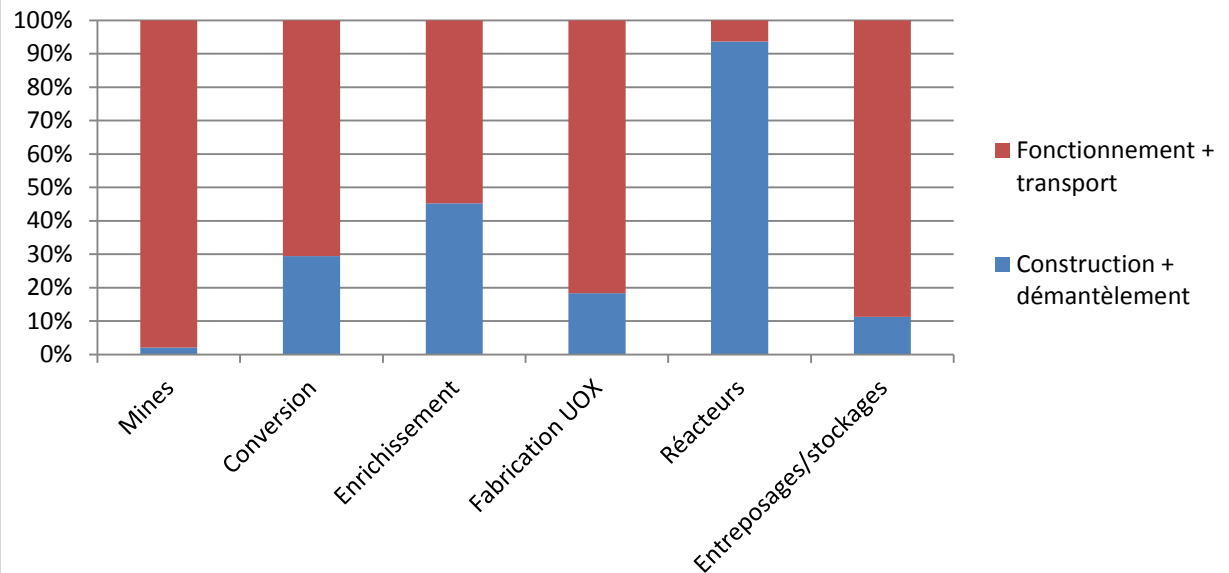
Nota : le total se rapporte à l'ensemble des usines (tableau réparti sur deux pages)

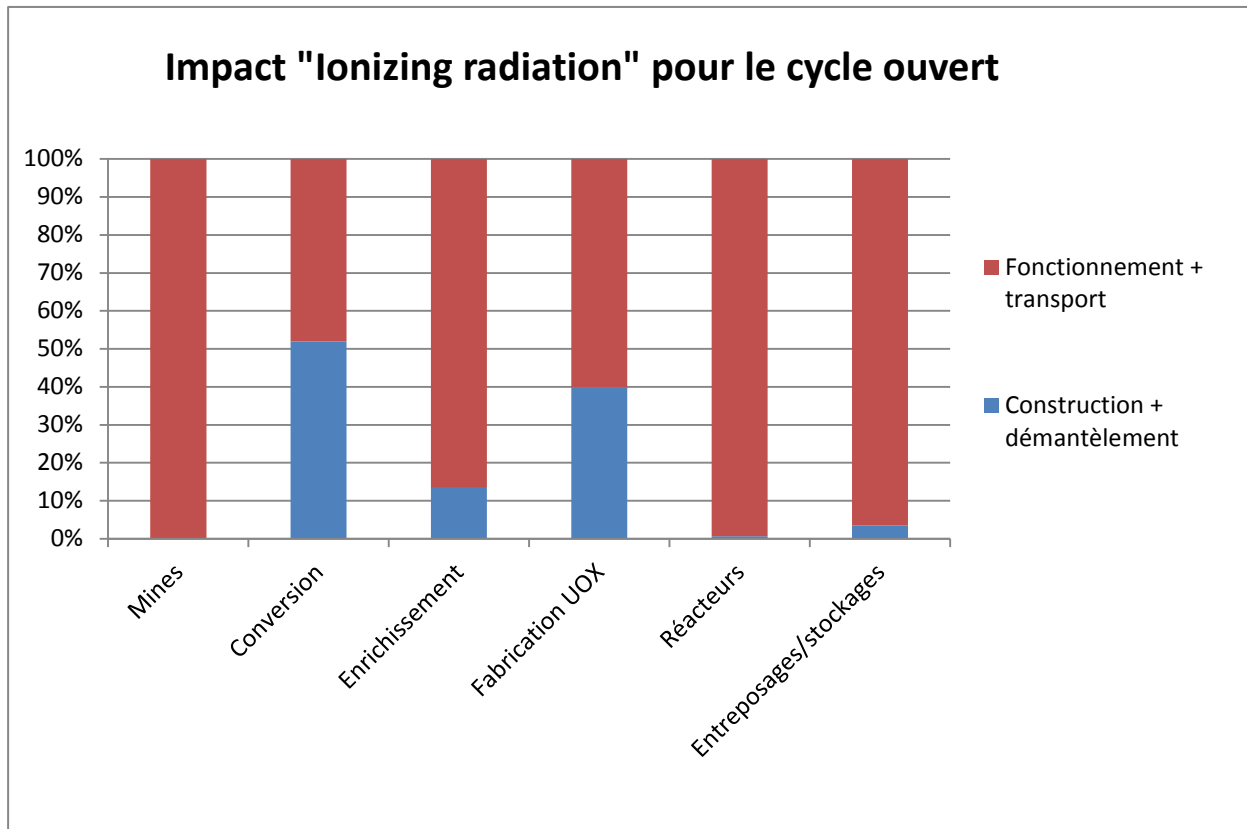
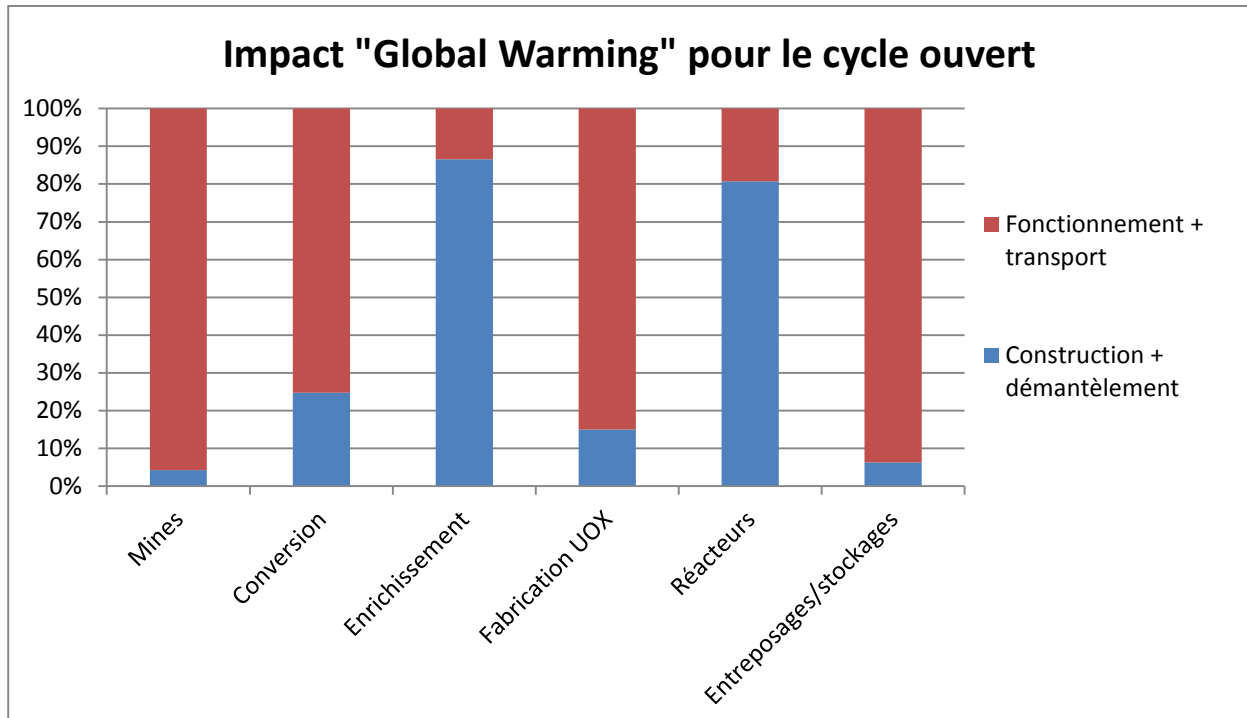
Impact	Unité	Opération	REP 900 MW	REP 1300 MW	REP 1450 MW	Entreposage Uapp	Entreposage UOX	CIRES	CSA	CIGEO surface	CIGEO TechCim	CIGEO UOX
Aquatic ecotoxicity	t TEG/MWh	cons+dem	1,21E-01	7,13E-02	1,43E-02	0	8,08E-04	1,21E-04	1,64E-04	6,04E-04	0	0
Aquatic ecotoxicity	t TEG/MWh	fonc+tr	5,54E-03	3,26E-03	6,51E-04	0	3,72E-03	0	8,42E-05	0	2,37E-04	2,00E-02
Aquatic acidification	t SO2/MWh	cons+dem	3,27E-06	1,92E-06	3,85E-07	0	1,74E-08	4,56E-09	6,08E-09	2,58E-08	0	0
Aquatic acidification	t SO2/MWh	fonc+tr	1,32E-06	7,79E-07	1,56E-07	0	6,73E-07	0	6,54E-09	0	3,85E-09	5,38E-07
Aquatic eutrophication	t PO4/MWh	cons+dem	2,53E-07	1,49E-07	2,97E-08	0	2,18E-09	8,58E-10	8,98E-10	4,23E-09	0	0
Aquatic eutrophication	t PO4/MWh	fonc+tr	2,69E-08	1,59E-08	3,17E-09	0	1,10E-09	0	1,67E-10	0	3,47E-10	5,98E-08
Carcinogens	t C2H3Cl/MWh	cons+dem	1,48E-05	8,70E-06	1,74E-06	0	9,57E-08	3,60E-08	3,86E-08	1,81E-07	0	0
Carcinogens	t C2H3Cl/MWh	fonc+tr	1,01E-06	5,93E-07	1,19E-07	0	6,77E-08	0	1,02E-08	0	1,60E-08	2,67E-06
Global Warming	t CO2/MWh	cons+dem	5,73E-04	3,37E-04	6,74E-05	0	4,26E-06	1,08E-06	1,52E-06	6,75E-06	0	0
Global Warming	t CO2/MWh	fonc+tr	1,37E-04	8,07E-05	1,61E-05	0	5,89E-05	0	2,05E-06	0	9,20E-07	1,42E-04
Ionizing radiation	MBq/MWh	cons+dem	1,05E-04	6,15E-05	1,23E-05	0	1,43E-06	1,81E-08	1,04E-07	2,38E-08	0	0
Ionizing radiation	MBq/MWh	fonc+tr	1,42E-02	1,13E-02	1,62E-03	0	1,01E-05	7,56E-08	7,31E-07	0	5,31E-07	3,11E-05
Non carcinogens	t C2H3Cl/MWh	cons+dem	1,80E-05	1,06E-05	2,12E-06	0	1,24E-07	3,76E-08	4,41E-08	2,01E-07	0	0
Non carcinogens	t C2H3Cl/MWh	fonc+tr	5,83E-07	3,43E-07	6,85E-08	0	2,06E-07	0	2,77E-08	0	2,51E-08	3,61E-06
Ozone layer depletion	t CFC-11/MWh	cons+dem	1,91E-10	1,12E-10	2,24E-11	0	2,28E-12	6,63E-14	2,14E-13	2,76E-13	0	0
Ozone layer depletion	t CFC-11/MWh	fonc+tr	2,43E-11	1,43E-11	2,86E-12	0	1,54E-11	0	7,99E-14	0	8,27E-13	5,18E-11
Terrestrial acidification	t SO2/MWh	cons+dem	1,46E-05	8,56E-06	1,71E-06	0	6,44E-08	1,72E-08	2,42E-08	9,95E-08	0	0
Terrestrial acidification	t SO2/MWh	fonc+tr	9,06E-06	5,33E-06	1,07E-06	0	5,05E-06	0	2,70E-08	0	1,41E-08	2,10E-06

Impact "Aquatic ecotoxicity" pour le cycle ouvert



Impact "Carcinogènes" pour le cycle ouvert





8.8 Annexe 8 : Paramètres pour l'étude de sensibilité

Les études d'ACV fournissent des résultats numériques précis, sans estimation d'incertitude, alors que le nombre d'hypothèses à différents niveaux et les données estimées conduisent inmanquablement à des incertitudes potentiellement importantes sur les résultats finaux.

C'est pourquoi il est important de réaliser une étude de sensibilité pour apprécier l'impact sur les résultats d'un nombre limité de paramètres bien choisis. Ainsi, les valeurs suivantes pourraient être individuellement testées, pour évaluer dans quelle mesure elles sont susceptibles de modifier ou pas les résultats obtenus par l'ACV.

Paramètre	Valeur nominale	Autres valeurs à tester
Répartition des types de mines	Proportions des 3 types pour le parc français annoncé par EDF (MS : 54 %, MCO : 18 %, ISL : 28 %)	Proportions de l'exploitation mondiale (52 % ISL, 32 % MS, 16 % MCO)
Durée de vie des installations	50 ans	40 et 60 ans (piloté par la durée de vie des réacteurs) ; à voir pour les sites de stockage
Durée des entreposages de déchets avant stockage	Variable selon les types de déchets (ex : 60 ans pour les combustibles UOX en cycle ouvert → impact sur le nombre de piscines à construire)	Valeurs minimales : temps d'entreposage réduit Valeurs maximales : augmenter les durées d'entreposage des déchets MA-VL et HA pour réduire l'emprise au stockage
Matériaux de construction	Faible prise en compte des matériaux pour les équipements de procédé	Ajouter des valeurs estimées pour les différentes usines (exercice nécessitant une concertation avec les exploitants pour prendre des valeurs raisonnables)
Energie de construction/déconstruction	Valeurs incertaines	Maximiser ou minimiser ces énergies

Deux autres paramètres ont été évoqués, mais sont de moindre importance :

- les transports depuis des sites plus éloignés (Canada, Australie) que les mines du Niger et du Kazakhstan : paramètre abandonné compte tenu de la faible part des transports dans le bilan global ;
- un taux d'appauvrissement de l'usine d'enrichissement pouvant varier de 0,2 à 0,3 % U235 (valeur moyenne actuelle : 0,25 %), qui influence sensiblement les quantités d'uranium naturel requises pour les cycles envisagés : pas d'impact sur l'étude demandée car on considère le même taux d'appauvrissement pour les deux scénarios.