

Arrêté PNGMDR du 23/02/2017 article 9

Réunion GT PNGMDR du 21/12/2018

21/12/2018



Sommaire

- 1. Déclinaison de l'article 9**
- 2. Description monorecyclage Pu et cycle ouvert - Calcul des flux**
- 3. Usines prises en compte**
- 4. Données d'inventaire et hypothèses**
- 5. Analyse de Cycle de Vie**
- 6. Résultats et discussions**

01

Déclinaison de l'article 9

Déclinaison de l'article 9

Art. 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.

Areva remet les résultats de cette analyse au ministre chargé de l'énergie avant le 30 juin 2018.

L'ASN est saisie pour avis sur cette étude.

Choix du type de réponse en comité de pilotage (Orano, CEA, EDF)

→ Analyse de cycle de vie (ACV)

Cycles considérés

Monorecyclage Pu à l'équilibre (cycle actuel, sans recyclage URT) vs. Cycle ouvert (hypothétique)

Systeme étudié

Systeme électronucléaire français

Production électrique ~420 TWh/an

Calcul des flux de matières et déchets en conséquence

Réacteurs: parc nucléaire actuel d'EDF 63,2 GWe

Mines et Usines du cycle et les transports intersites associés

Stockage: prise en compte du projet CIGEO dans sa configuration actuelle

L'ensemble des installations est alimentée par le MIX électrique français actuel

Impact significatif sur l'impact de certaines installations, GBII en particulier

Cycle de vie de chaque installation

Prises en compte des étapes de construction, fonctionnement, assainissement/démantèlement

Hypothèses d'étude

Choix de considérer des systèmes à l'équilibre

Calcul des flux en considérant le système à l'équilibre

Approche classique en modélisation sur des systèmes complexes

Simplification des hypothèses et des interprétations des résultats

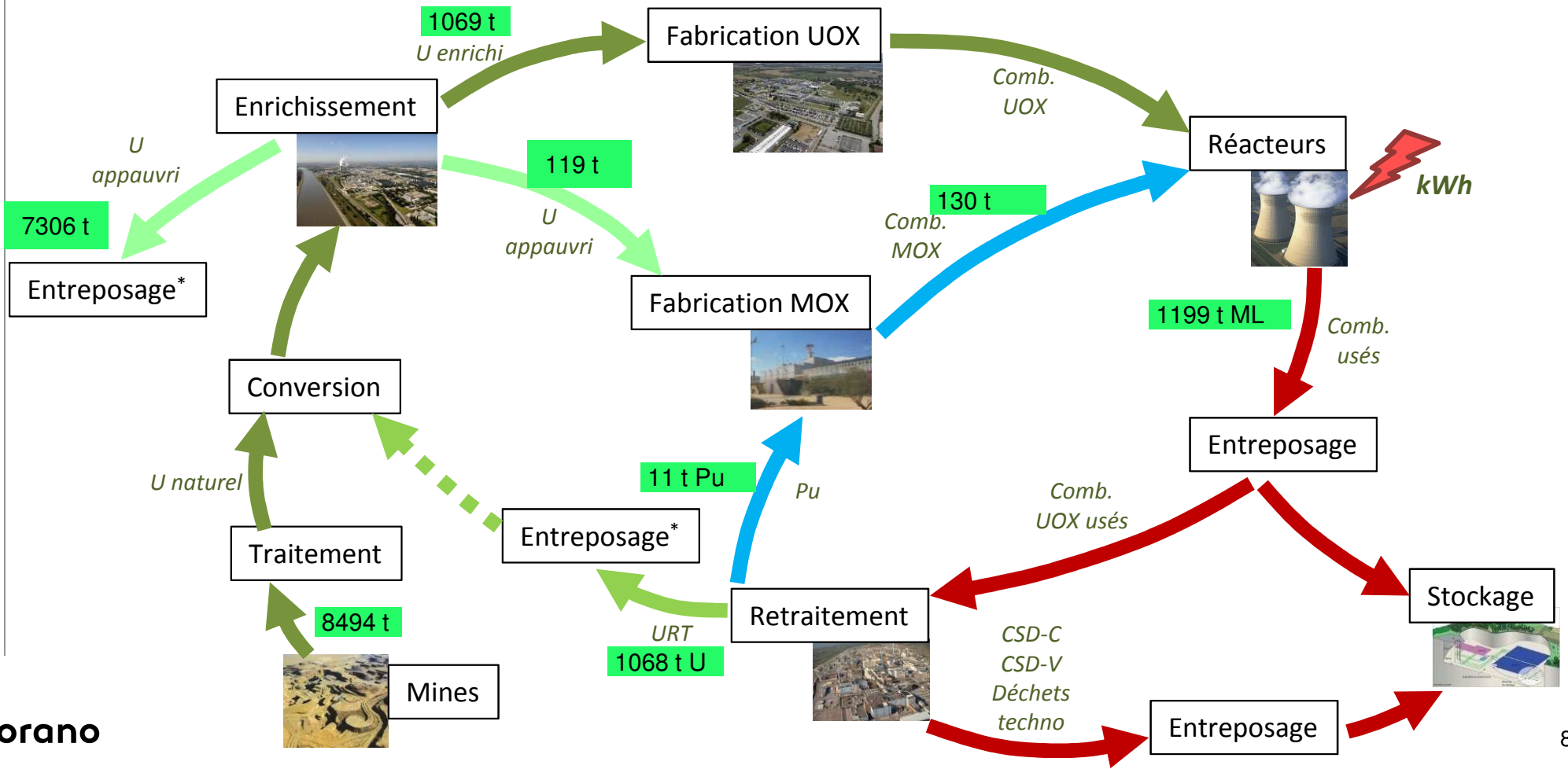
Cas particulier

Annualisation des impacts liés au début ou à la fin de vie

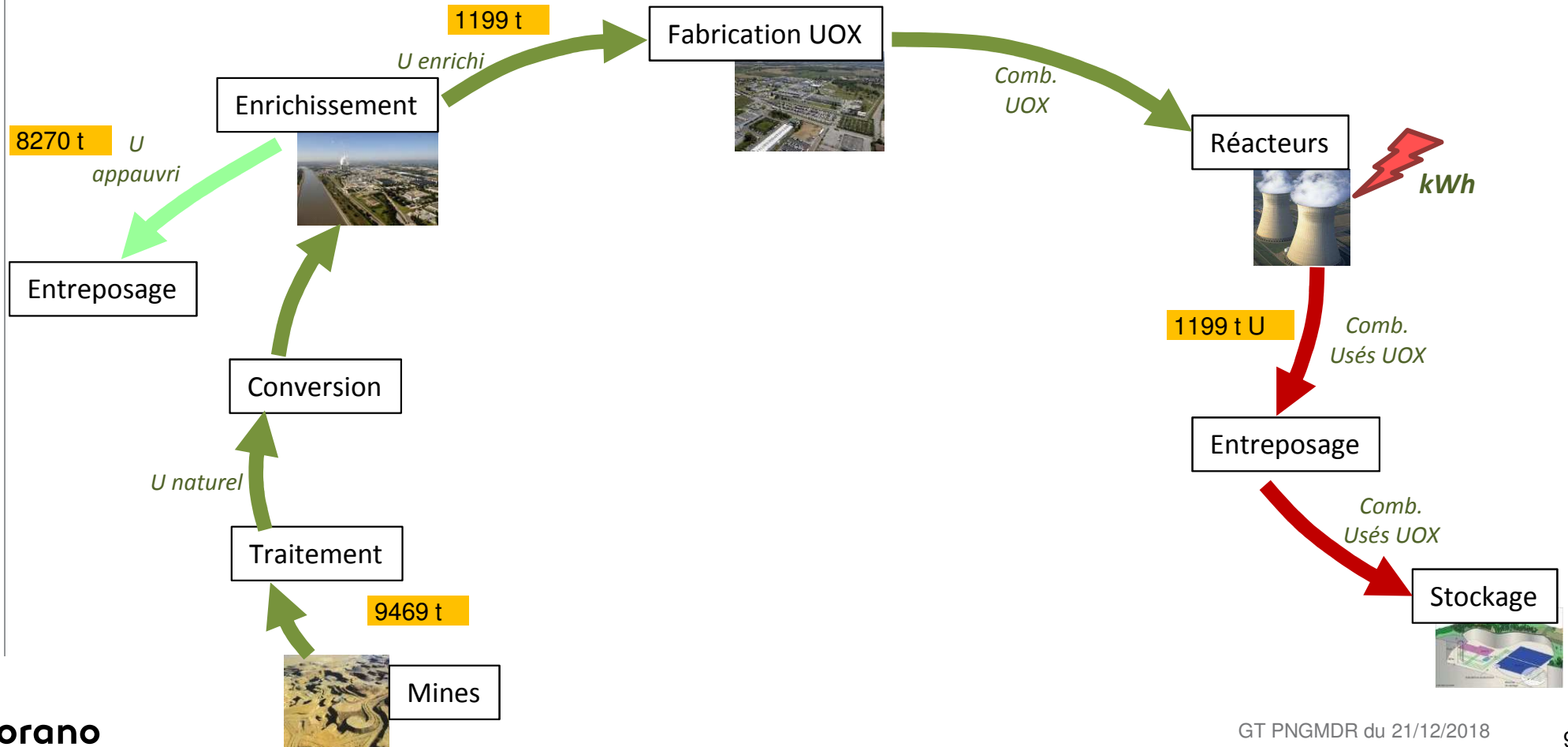
02

Description
« monorecyclage Pu » et
« cycle ouvert »
Calcul des flux

Monorecyclage Pu: Recyclage URT et Uapp non considéré



Cycle ouvert (hypothétique)



Comparaison des flux entre les deux scénarios

Outre l'impact du recyclage, les flux d'U naturel sont fonction de la teneur résiduelle de l'Uapp en ^{235}U

U235 app (%)	Cycle actuel à l'équilibre (24 réacteurs moxés)	Cycle ouvert	Ecart (tU)
0,2	7767	8660	893
0,25	8494	9469	975
0,3	9397	10475	1078

Valeurs de référence pour l'étude



Economie de ressource monorecyclage Pu seul vs. cycle ouvert ~10%
Indépendant de la teneur résiduelle en ^{235}U

03

Usines prises en compte

Approche générale et liste des usines

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 combustibles
Retraitement	La Hague (usines UP2-800 et UP3)	Retraitement du combustible usé
	TU5 Pierrelatte	Dénitration de l'URT
Fabrication MOX	Mélox	Fabrication du combustible MOX
	Lingen (Allemagne)	Fourniture 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

Le choix a été fait de considérer des usines Orano, dont les données sont disponibles (rapports publics annuels, bilans réglementaires...), comme références en terme d'impact environnemental pour cet exercice

Approvisionnement de l'uranium

Origine très variée de l'U : les émissions des mines dépendent fortement du type d'extraction

Mine Souterraine (MS), Mine Ciel Ouvert (MCO), In Situ Leaching (ISL)

Le tableau ci-dessous précise la répartition de l'approvisionnement d'EDF retenu dans l'étude et identifie les mines prises en référence pour chaque type d'extraction

Type de mine	Répartition EDF (%)	Mines "modèles"	Quantité U pour EDF (t)	Production 2015 des 3 mines modèles (tU)
MS	54	Cominak (Niger)	4587	1607
MCO	18	Somaïr (Niger)	1529	2509
ISL	28	Katco (Kazakhstan)	2378	4007

04

Données d'inventaire et hypothèses

Méthodologie

GT d'interface avec les différents exploitants pour remplir un inventaire de l'année de référence (2015 ou 2016, la plus proche du régime nominal)

❖ Intrants

- Matériaux de construction
- Emprises au sol
- Energie
- Eau prélevée (et consommée pour les centrales)
- Matières premières et principaux réactifs

❖ Extrants

- Emissions atmosphériques chimiques
- Emissions atmosphériques radioactives
- Poussières
- Rejets liquides chimiques
- Rejets liquides radioactifs
- Déchets conventionnels
- Déchets radioactifs

Limites des données d'inventaire et décisions (1/2)

❖ Réactifs

Inventaire des principaux réactifs utilisés dans les procédés mais sans inventaire exhaustif (produits de laboratoire, démantèlement, maintenance...)

- Bilan de la fabrication des réactifs avec application de la méthode IMPACT2002+
- **Leur transport n'est pas pris en compte** car les fournisseurs évoluent d'une année à l'autre et les lieux réels de fabrication sont variables et potentiellement multiples.

❖ Certaines données ne sont pas disponibles, en particulier pour les installations en projet

- **Exemple** : Site ANDRA de Cigéo
Seuls les volumes excavés et les emprises peuvent être estimés ; **l'énergie l'a été également**
- **Résidus miniers** : déchets non conditionnés émettant des poussières (rejets diffus) pouvant relarguer des éléments chimiques → émissions potentielles (principe majorant de l'ACV) sur les sols et la nappe, même sous climat très sec (~100 mm/an à Arlit)
 - ✓ Des données Ecoinvent existent pour des rejets unitaires en Amérique du nord → difficulté à extrapoler au Niger

Rejets liquides potentiels par les résidus de traitement des mines

On a choisi 3 mines modèles Orano pour représenter la diversité du mix minier.

Les modes de gestion des résidus de traitement peuvent diverger entre exploitants et ces différences ne permettent pas d'exclure de possibles infiltrations vers le sous-sol, connues en ACV comme empreinte environnementale des mines à moyen terme.

L'approche **majorante** consiste donc à ne pas négliger ces sources de rejets et à utiliser des extrapolations de valeurs issues de la littérature (une modélisation fine du transfert des polluants vers le sous-sol ne relève pas d'une ACV statique classique).

- Au final, 2 types de rejets « miniers » :
- Rejets réels (reflet des mines Orano)
 - Rejets potentiels (reflet du mix minier)

Nota : on conserve systématiquement les poussières et les fuites d'H₂SO₄ vers le sous-sol de la mine ISL

Rejet potentiel = rejet unitaire * production
* correction de pluviométrie (Canada → Niger)



Elément	Rejets unitaires MCO (kg/kg U produit)	Rejets potentiels Somair (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	

Source pour les rejets unitaires : Dones, R. « Uranium ore mining » Ecoinvent Report 6-VII, 2009 (basé sur des mines nord américaines des années 1980)

Limites des données d'inventaire (2/2)

❖ Périmètre de l'étude

Cas du zircaloy, qui fait intervenir 5 usines depuis le minerai de zircon, n'est pas pris en compte
Estimation du bilan de la fabrication du zircaloy, affecté au prorata des productions de Romans et Mélox

❖ Cas particulier des données de construction & démantèlement :

➤ Construction

Prise en compte des matériaux de structure de génie civil (béton, acier) et estimation des énergies nécessaires à la réalisation de ces chantiers

Une étude poussée, incompatible avec les délais, serait nécessaire pour pouvoir prendre en compte les éléments de procédé (cuves, réacteurs, tuyauterie, câblages,...)

➤ Démantèlement

Prise en compte des estimations des quantités de déchets futurs pour l'essentiel des installations

Hypothèse pour les énergies nécessaires (dépendent fortement du scénario mis en œuvre) : 100 % de l'énergie de construction

▪ Résumé → règle générale appliquée :

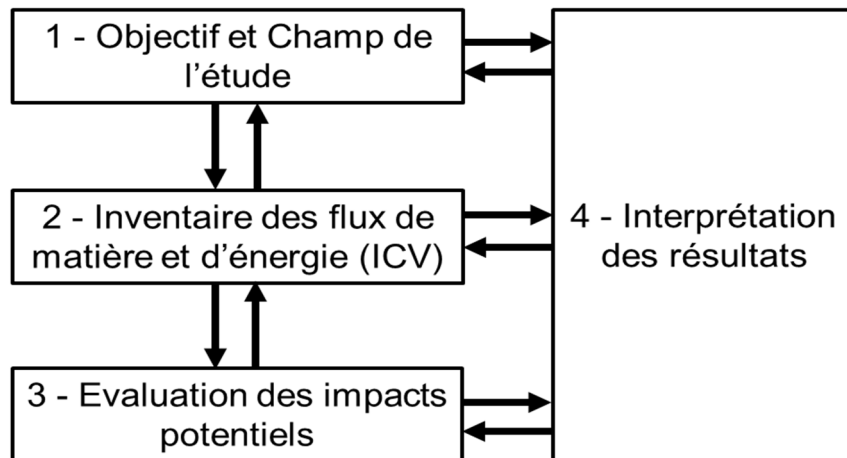
Lorsque des données précises ne sont pas disponibles, on les complète en traçant les hypothèses

Conseil retrouvé fréquemment en ACV : « *L'étape d'inventaire consiste en une collecte de données qu'il faut recenser ou savoir estimer en cas de carence* »

05

Analyse Cycle de Vie

Les quatre étapes constitutives d'une ACV (1/3)



1 - La définition des objectifs et du champ de l'étude indique le système étudié (unité de référence) et précise le problème posé et les objectifs de l'étude (par exemple : « Réaliser une comparaison entre 2 stratégies de gestion des combustibles usés »)

2 - L'inventaire du cycle de vie (ICV) répertorie et quantifie les flux de matière et d'énergie entrant et sortant de chaque système et sous système. Les flux considérés sont de deux types :

- ✓ les émissions/consommations directes, générées par le procédé principal de l'étape
- ✓ les émissions/consommations indirectes, provenant des filières connexes

L'étape d'inventaire, souvent longue et compliquée, consiste en une collecte de données qu'il faut recenser ou savoir estimer en cas de carence

3 - L'évaluation des impacts potentiels sur l'environnement consiste à traduire les flux inventoriés en un nombre réduit d'"indicateurs d'impact potentiel" quantifiant la contribution potentielle du système à des grands problèmes environnementaux (effet de serre, acidification, etc.), grâce à des coefficients préétablis permettant de calculer la contribution de chaque flux aux divers impacts environnementaux étudiés

Les quatre étapes constitutives d'une ACV (2/3)

4 - L'interprétation des résultats consiste à analyser les informations obtenues dans les étapes précédentes en fonction des objectifs retenus. Cette étape est itérative avec les 3 précédentes de manière à toujours valider que les résultats obtenus permettent de répondre aux objectifs de l'étude et aussi de tester la robustesse des résultats par des analyses de sensibilité. De nouvelles hypothèses peuvent alors être faites et l'étude précisée.

Les différents flux issus d'un inventaire ACV peuvent être rassemblés en un indicateur d'impact potentiel représentatif de l'impact du système étudié sur un problème environnemental. Les indicateurs d'impact potentiel couramment utilisés en ACV sont l'effet de serre, l'épuisement des ressources naturelles, l'acidification atmosphérique, la formation photochimique d'ozone troposphérique, l'eutrophisation des eaux, la toxicité et l'écotoxicité.

Pour exprimer les résultats de l'analyse et permettre la comparaison, il est défini une unité fonctionnelle. C'est un élément de mesure qui permet de quantifier la fonction remplie par le produit étudié. Par exemple, pour de la production électrique, l'unité fonctionnelle est le kWh.

Les quatre étapes constitutives d'une ACV (3/3)

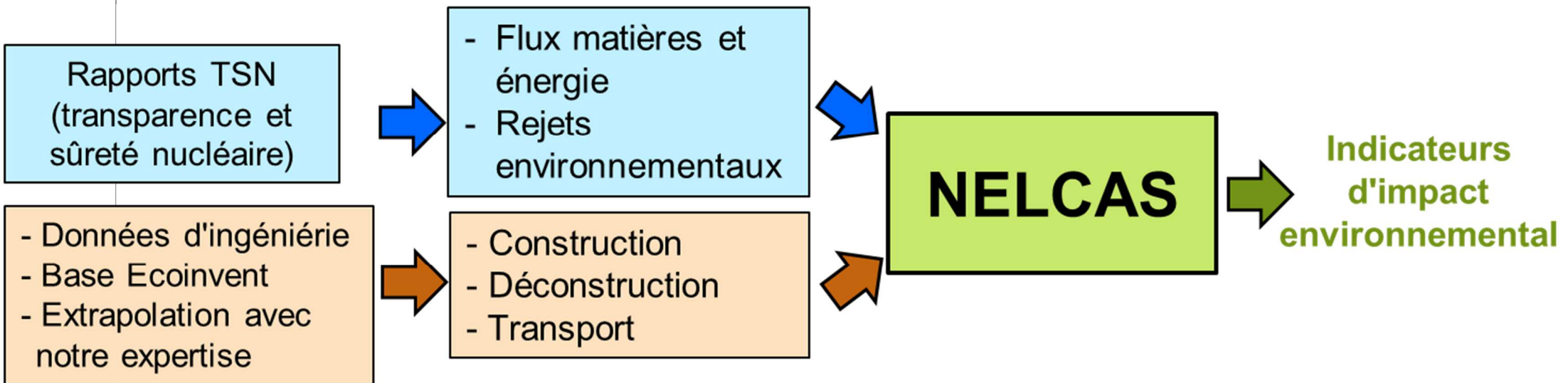
L'ACV ne propose donc pas des impacts réels mais des indicateurs d'impacts potentiels. Par exemple, l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [15b, 15c] a déterminé la contribution à l'effet de serre de 25 gaz (CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC, SF₆, ...), à trois horizons de temps (20, 100 et 500 ans), en prenant comme référence le CO₂. L'indicateur ainsi obtenu en pondérant les différentes émissions est exprimé en "équivalent CO₂". Aucune évaluation des conséquences quantitatives de cet équivalent CO₂ (élévation de la température, élévation du niveau de la mer, etc.) n'est directement associée ; mais cela permet de classer le cycle électrogène ou le produit ayant la plus faible émission de gaz à effet de serre comme celui présentant la meilleure performance environnementale au niveau de cet indicateur.

Les résultats d'une ACV sont ainsi exprimés sous forme d'une série de résultats qui présente à la fois des impacts potentiels (du type « X kg de d'équivalents CO₂ pour l'effet de serre », « Y kg d'équivalents SO₂ pour l'acidification », ...) et des flux physiques (« Z MJ d'énergies non renouvelables », « W kg de déchets banals », ...). Certains consultants ou logiciels vont jusqu'à pondérer les différents résultats obtenus afin d'obtenir une note unique, mais cette pratique est aujourd'hui rejetée par la majorité des acteurs du fait de l'absence de consensus sur des coefficients permettant notamment d'additionner en les pondérant des impacts de nature différente (effet de serre, acidification, déchets...).

Outil développé par le CEA (1/2)

- Un outil logiciel a été développé à Marcoule, à la fois base de données, outil de calcul et mise en forme des résultats :

Nuclear **E**nergy **L**ife **C**ycle **A**ssessment **S**imulation (NELCAS)



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

Outil développé par le CEA (2/2)

- ❖ Données d'entrée :
 - Emissions annuelles de chaque installation de référence
 - "Du berceau à la tombe » : contributions intégrant la construction répartie sur la durée de production (uniformisée à 50 ans, sauf entreposages)
 - Transport du combustible entre chaque installation, de la mine au réacteur et du réacteur au stockage ou au recyclage
 - Transport des déchets de chaque site vers chaque site ANDRA concerné
- ❖ Calcul des impacts en fonction de la production des installations du cycle modélisé
- ❖ Possibilité de choisir les catégories d'impact les plus adaptées à l'industrie nucléaire
- ❖ Intérêt de l'outil :
 - Maîtrise des données de base avec regard critique
 - Réalisation des bilans matière (matières nucléaires & déchets)
 - Dédié à la gestion des scénarios nucléaires actuels et du futur, par exemple:
 - ✓ Comparaison de l'empreinte environnementale du cycle ouvert et monorecyclage Pu (art. 9)
 - ✓ Différentiel d'impact entre le cycle actuel et un futur proche avec recyclage de l'URE

Critères et indicateurs couramment utilisés

Toxicité pour l'homme et pour l'environnement

Occupation des sols
(m²/GWh)

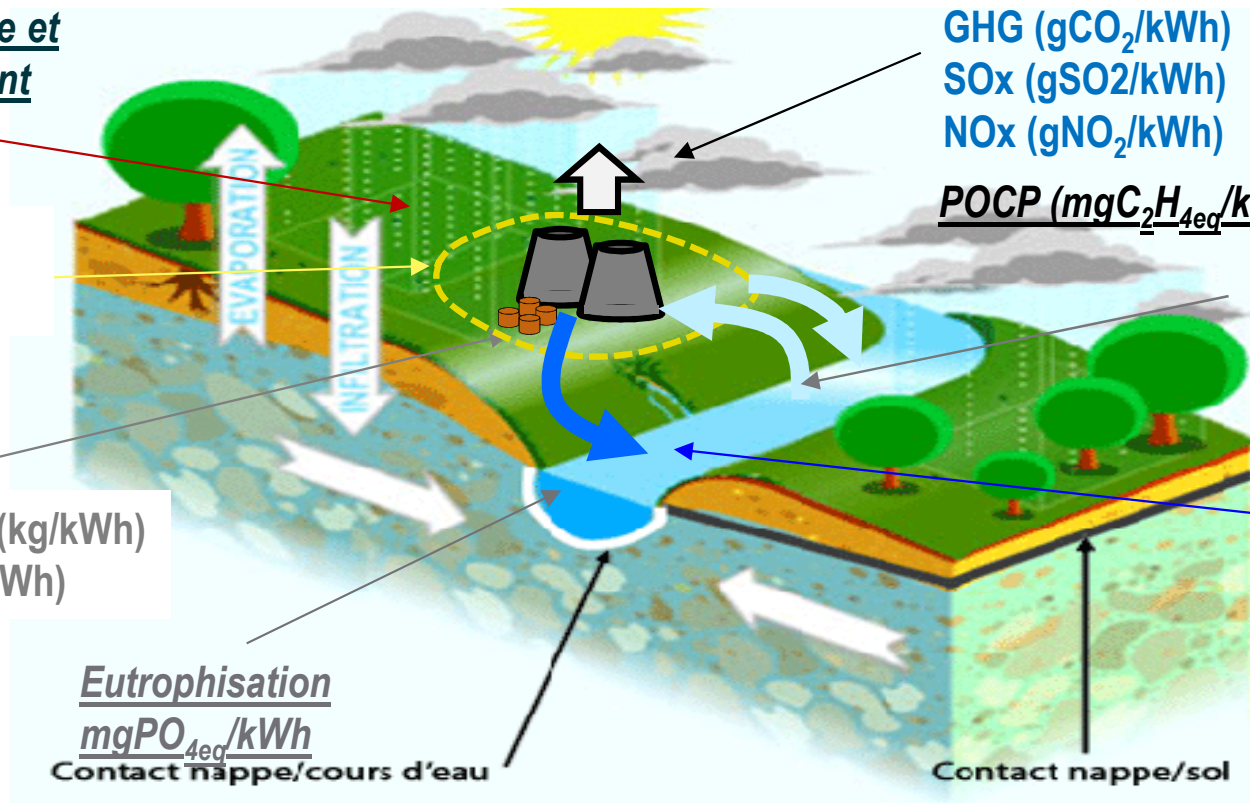
Déchets technologiques (kg/kWh)
Déchets radioactifs (m³/kWh)

Eutrophisation
mgPO_{4eq}/kWh
Contact nappe/cours d'eau

Rejets atmosphériques
GHG (gCO₂/kWh)
SO_x (gSO₂/kWh)
NO_x (gNO₂/kWh)
POCP (mgC₂H_{4eq}/kWh)

Utilisation et consommation
d'eau (L/MWh)

Polluants, Rejets
chimiques
(mg/kWh)



Catégories d'indicateurs retenues

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)
	Acidification terrestre	kg SO ₂ eq (ces rejets acidifient les sols)
	Acidification aquatique	kg SO ₂ eq
	Eutrophisation aquatique	kg PO ₄ eq
	Ecotoxicité aquatique	kg TEG eau
	Occupation du sol	m ² (surface des usines)
	Consommation d'eau (et rejetée pour les centrales)	m ³
	Extraction des ressources minérales	Limité à U naturel
Homme	Produits cancérigènes / non cancérigènes	kg C ₂ H ₃ Cl eq
	Emission de particules	kg PM _{2.5} eq
Spécifique du nucléaire	Emission de rayonnements ionisants (gazeux et liquides)	Bq C14 eq avec spectres réels des rejets
	Production de déchets radioactifs	Volume produit et m ² d'emprise de stockage ANDRA

Facteurs de caractérisation (FC)

- ❖ Définition (ISO 14040) :
Facteur 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
- ❖ Application au cas des radionucléides dans la méthode IMPACT2002+ :
- ❖ Ces coefficients sont issus d'études d'impact spatiales, expertisées par la communauté internationale des radioprotectionnistes

Air	Carbon-14	1
	Cesium-134	5,71E-02
	Cesium-137	6,19E-02
	Cobalt-58	2,05E-03
	Cobalt-60	7,62E-02
	Hydrogen-3	6,67E-05
	Iodine-129	4,48E+00
	Iodine-131	7,62E-04
	Iodine-133	4,48E-05
	Krypton-85	6,67E-07
	Krypton-85m	6,67E-07
	Lead-210	7,14E-03
	Plutonium-238	3,19E-01
	Plutonium-alpha	3,95E-01
	Polonium-210	7,14E-03
	Radium-226	4,33E-03
	Radon-222	1,14E-04
	Thorium-230	2,14E-01
	Uranium-234	4,62E-01
	Uranium-235	1,00E-01
Uranium-238	3,90E-02	
Xenon-133	6,67E-07	
Xenon-133m	6,67E-07	

→ Référence = 1

Bq C14 eq/Bq de radioélément considéré

Exemple de prise en compte de l'inventaire dans les calculs

Méthodologie adoptée pour le calcul d'impact radiologique des rejets liquides et gazeux des installations :

- Activité pondérée des RN possédant un FC
- Calcul du taux d'activité renseigné (tar)
- Estimation de l'impact « ionizing radiation » en corrigeant le calcul obtenu avec les RN avec FC du « tar »

Exemple:
Rejets gazeux pour 1 réacteur de 900 MW

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

06

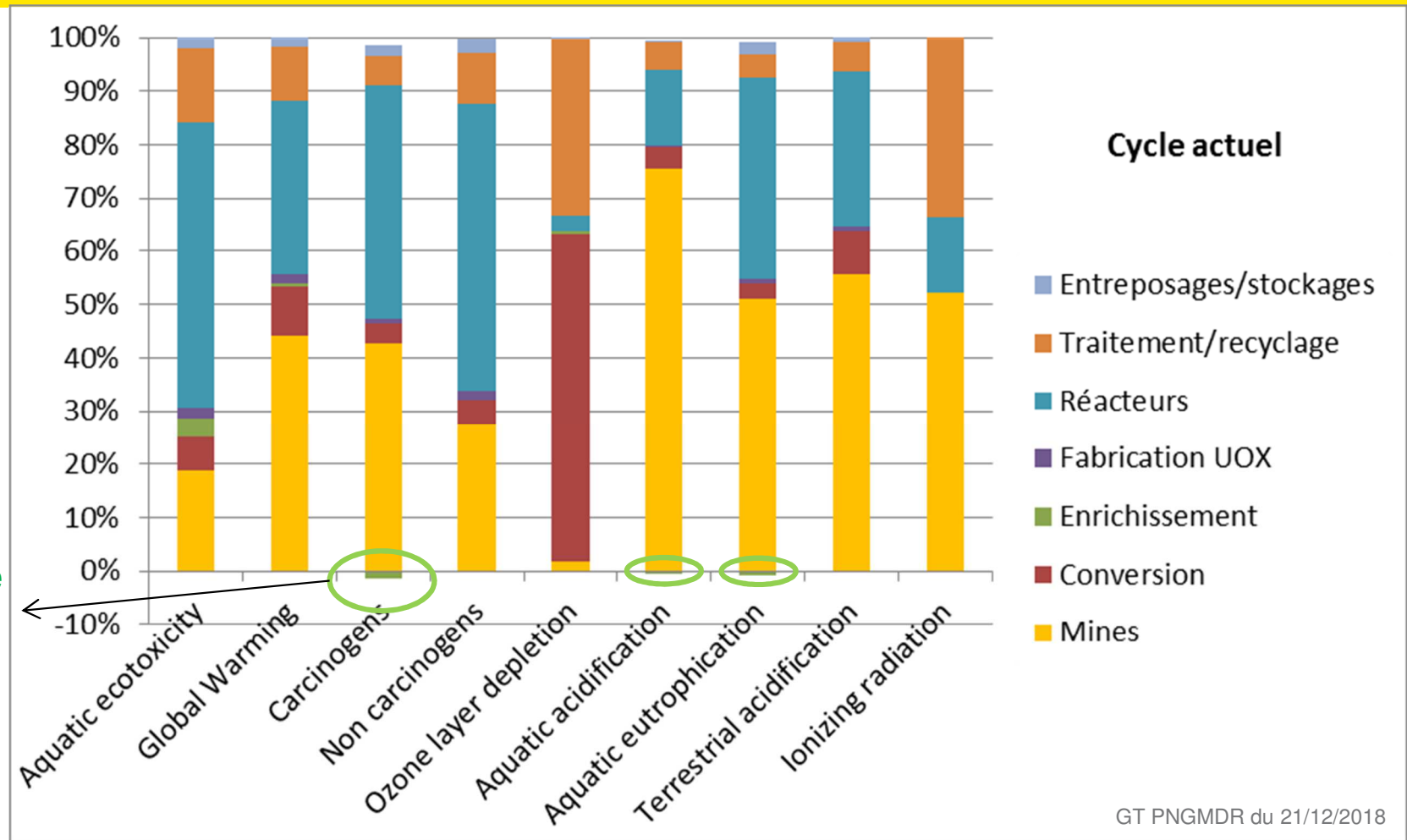
Résultats et discussion

Rappel des scénarios

- ❖ Cycle actuel & ouvert
- ❖ Sensibilité: avec ou sans rejet potentiel dans l'eau des résidus miniers
 - 4 séries de résultats

- ❖ Présentation des résultats :
 - Histogramme pour les 9 catégories IMPACT2002+
 - Histogramme pour les autres catégories (déchets, eau, occupation du sol)
 - Comparatif systématique des deux cycles sur un même graphique récapitulatif
 - Contribution des étapes de vie des installations aux impacts

Contribution des différentes étapes du cycle Monorecyclage 1



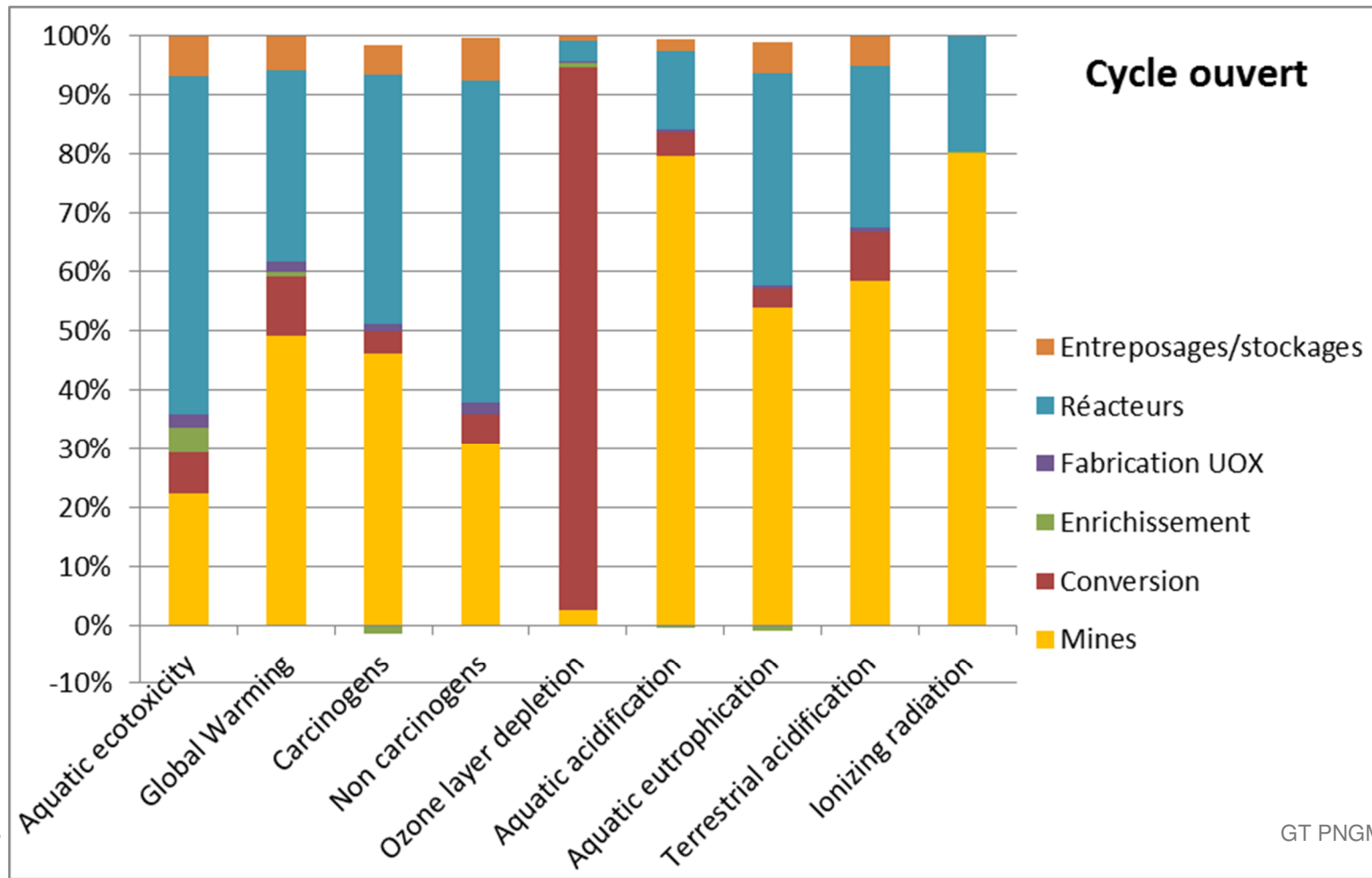
Impacts évités

- ❖ L'usine W à Pierrelatte défluore l'UF₆ appauvri en produisant de l'HF (7246 t HF 70 %/an)
 - cette quantité est comptabilisée négativement dans l'inventaire
 - on attribue en effet au système étudié un crédit environnemental puisque l'HF produit est vendu sur le marché, épargnant un impact environnemental lié à sa fabrication à d'autres utilisateurs (principe du recyclage)
 - Conséquences :
 - l'usine W a un impact négatif dans 7 catégories sur 9
 - l'enrichissement a un impact négatif dans 5 catégories

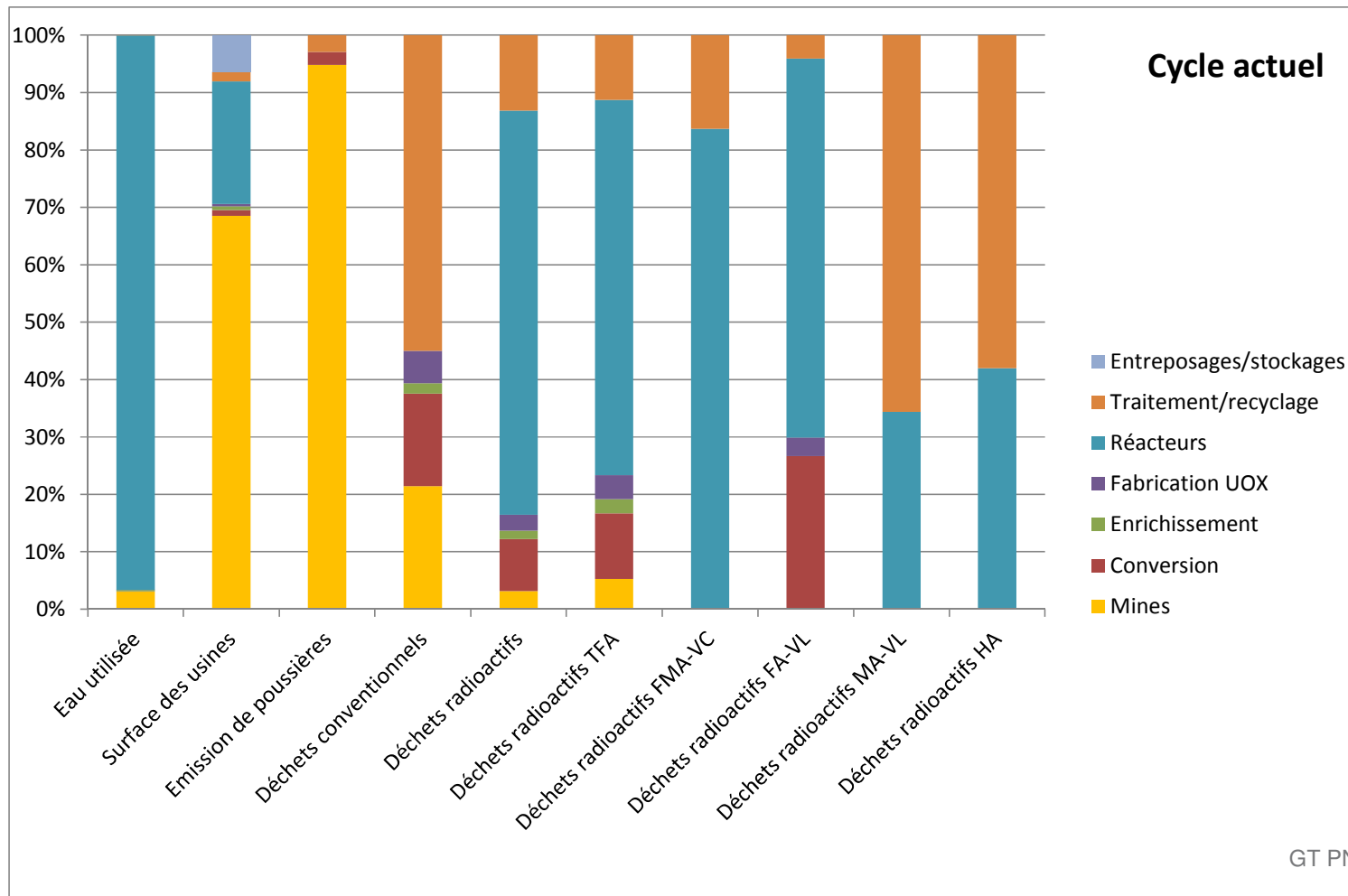
		GBII	SOCATRI	W	Total enrichissement	Part enrichissement du cycle
Aquatic ecotoxicity	t TEG/MWh	1,43E-02	3,82E-03	-3,68E-03	1,44E-02	3,58%
Global Warming	tCO ₂ /MWh	3,99E-05	1,47E-05	-3,03E-05	2,43E-05	0,65%
Carcinogens	t C ₂ H ₃ Cl/MWh	4,30E-07	2,67E-07	-1,57E-06	-8,74E-07	-1,46%
Non carcinogens	t C ₂ H ₃ Cl/MWh	9,26E-07	3,37E-07	-1,35E-06	-9,10E-08	-0,16%
Ozone layer depletion	t CFC-11/MWh	5,58E-11	1,29E-11	1,04E-13	6,87E-11	0,50%
Aquatic acidification	tSO ₂ /MWh	1,93E-07	9,57E-08	-5,39E-07	-2,51E-07	-0,45%
Aquatic eutrophication	tPO ₄ /MWh	8,08E-09	4,20E-09	-2,25E-08	-1,02E-08	-0,83%
Terrestrial acidification	tSO ₂ /MWh	6,37E-07	4,25E-07	-1,11E-06	-4,67E-08	-0,03%
Ionizing radiation	MBq/MWh	3,64E-05	9,52E-06	2,66E-06	4,86E-05	0,03%

Contribution des différentes étapes du cycle

Cycle ouvert 1

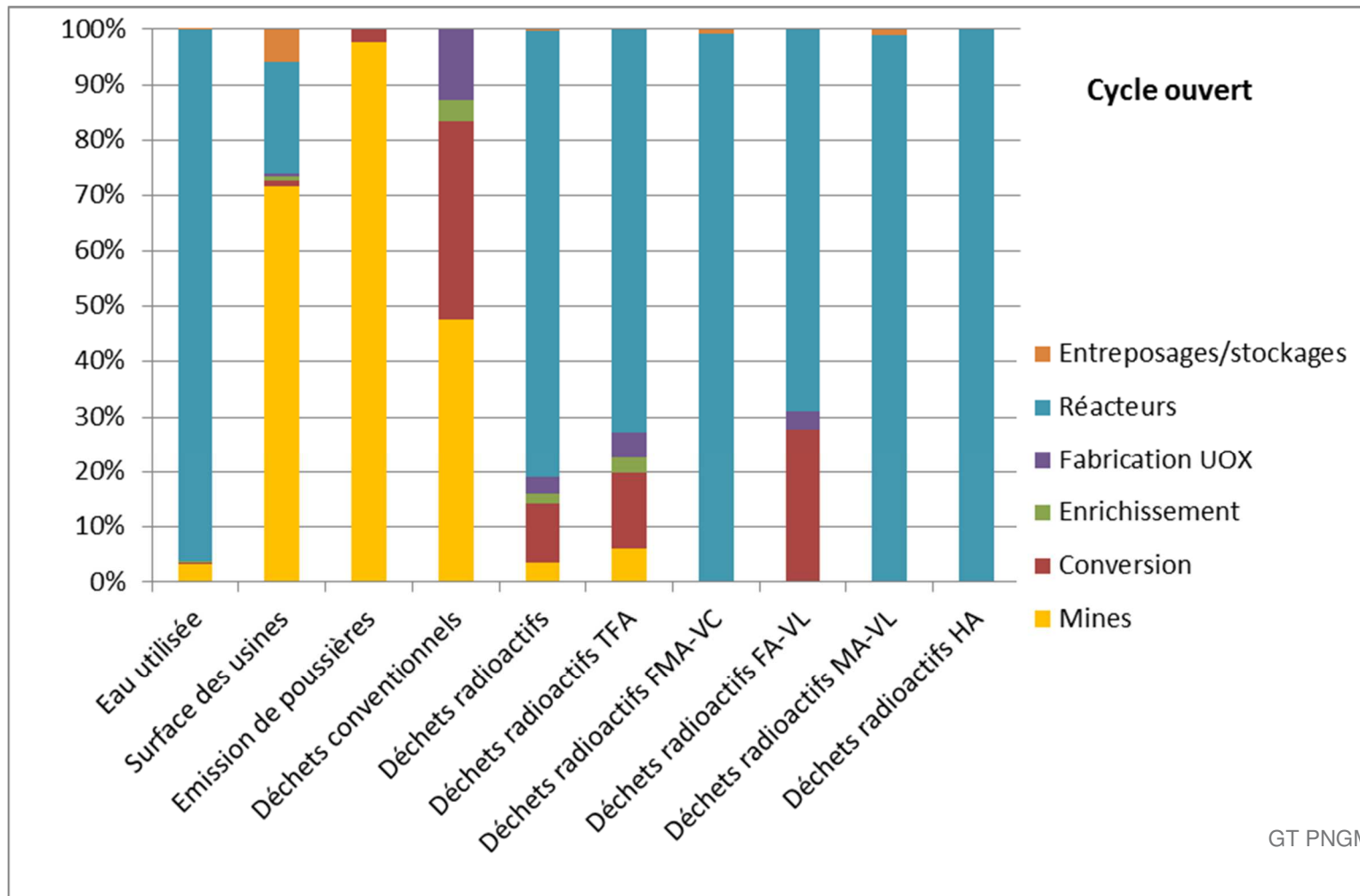


Contribution des différentes étapes du cycle Monorecyclage 2

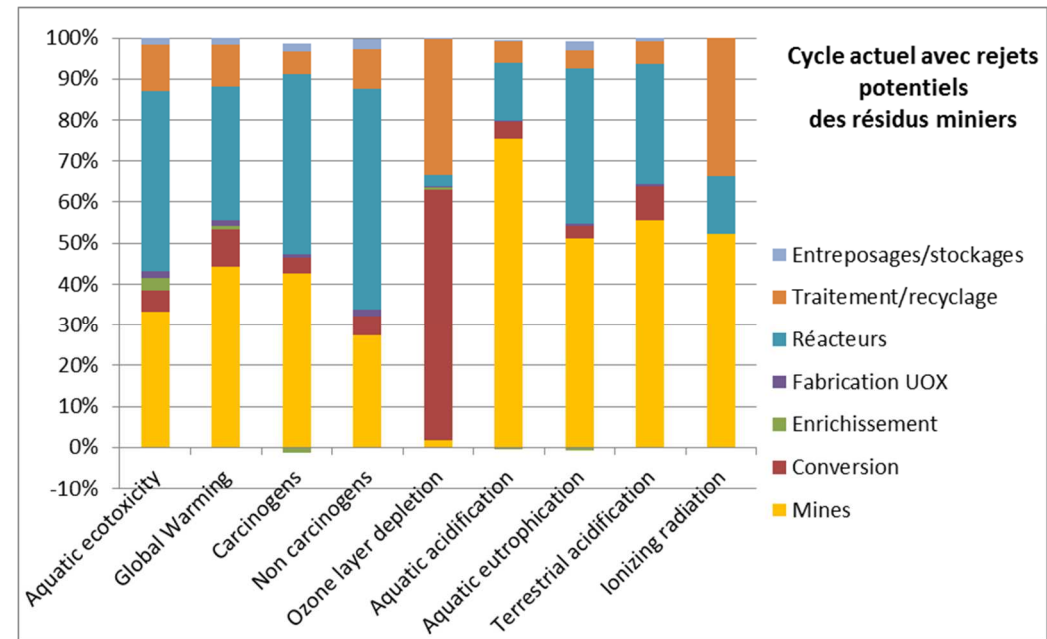
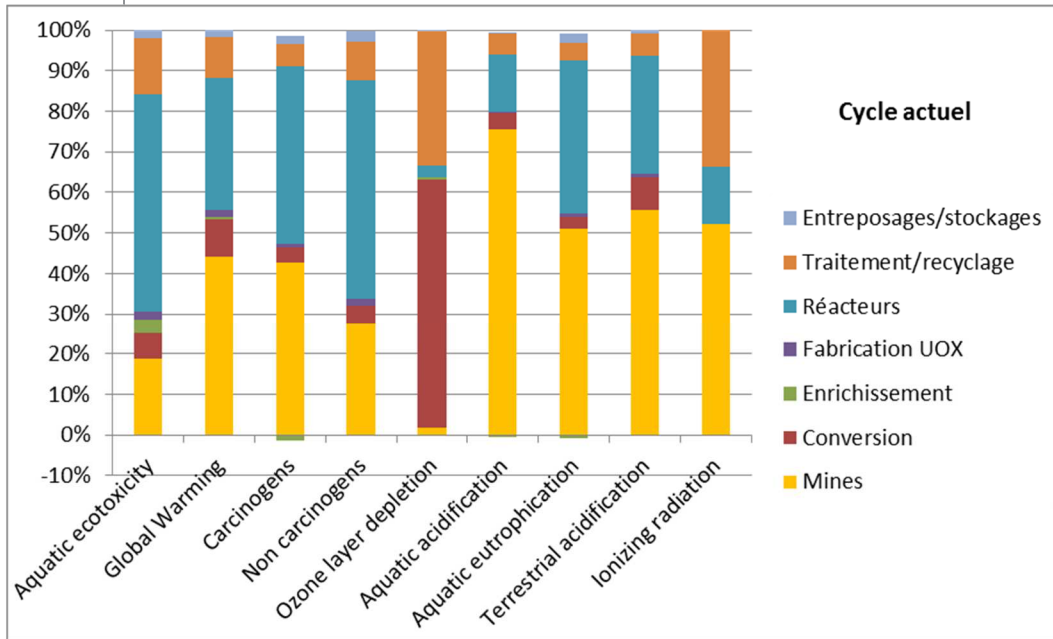


Contribution des différentes étapes du cycle

Cycle ouvert 2

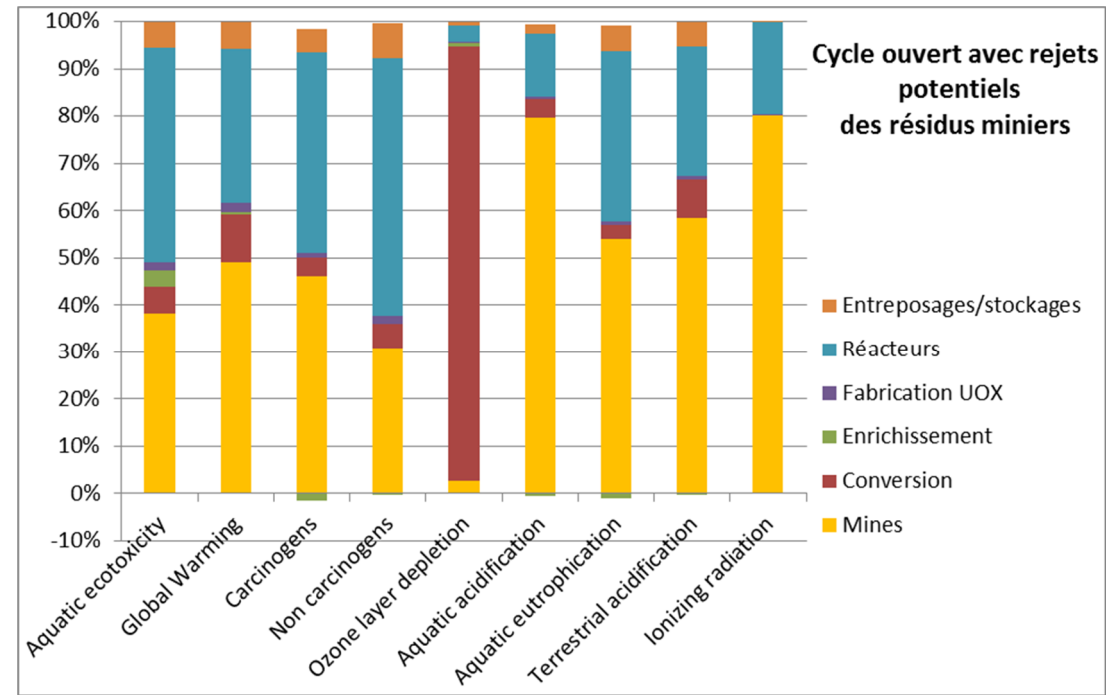
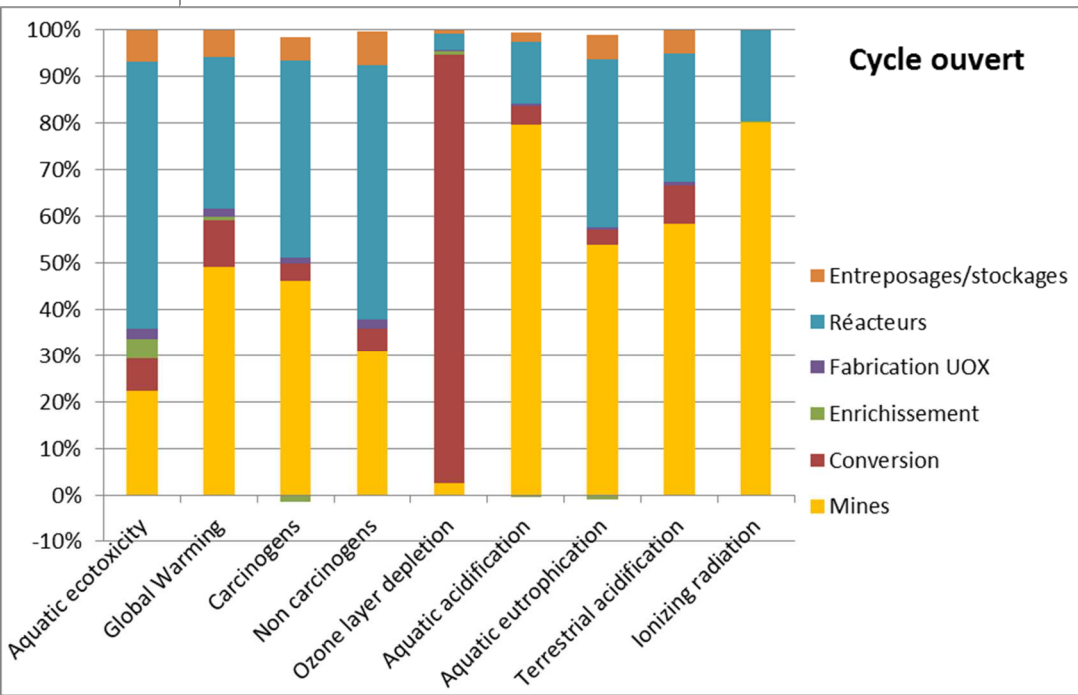


Monorecyclage Pu Avec ou sans rejets potentiels des résidus miniers

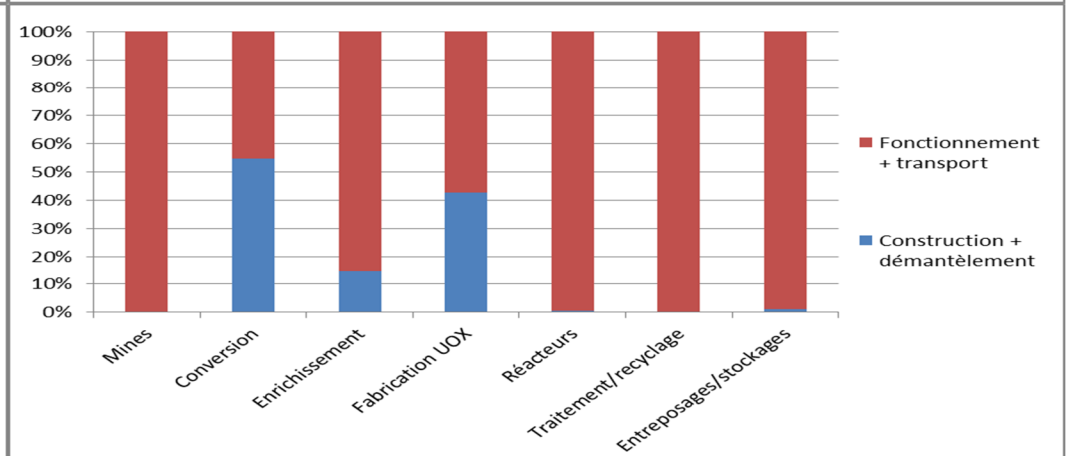
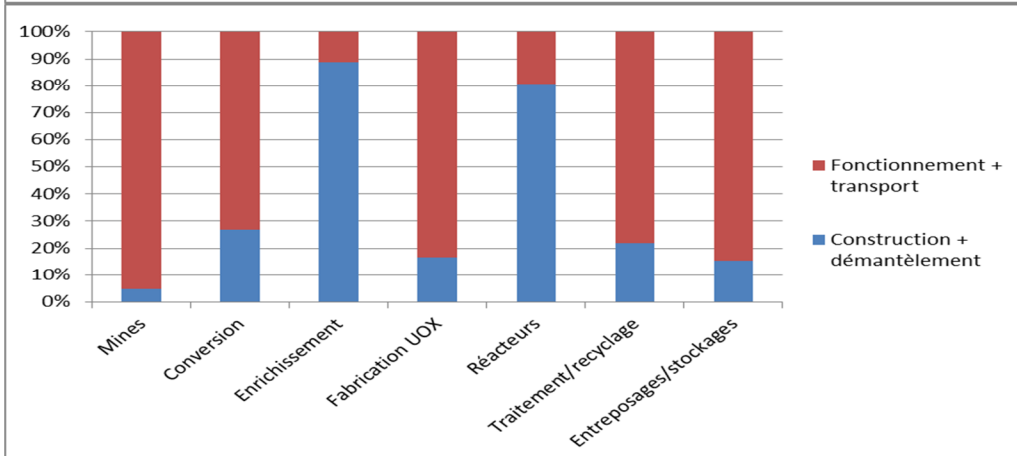
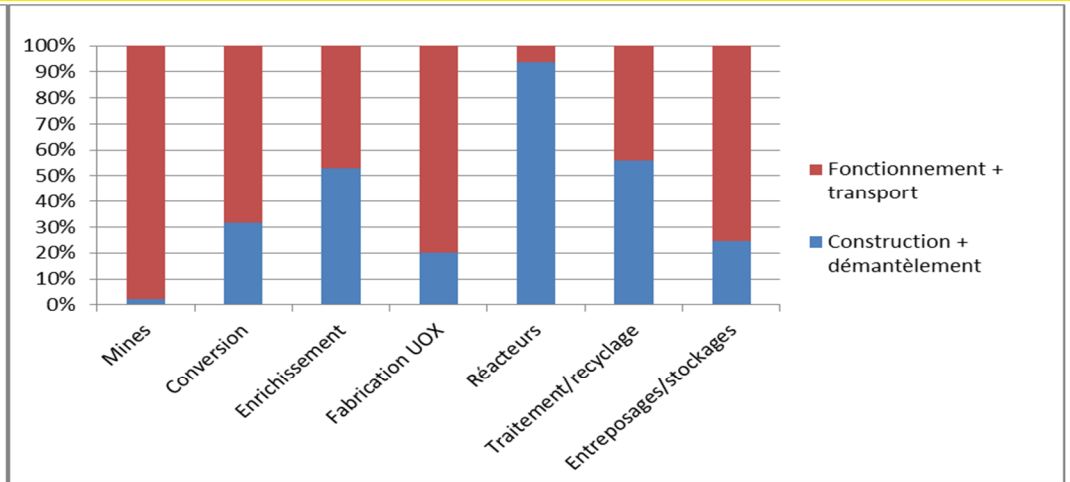
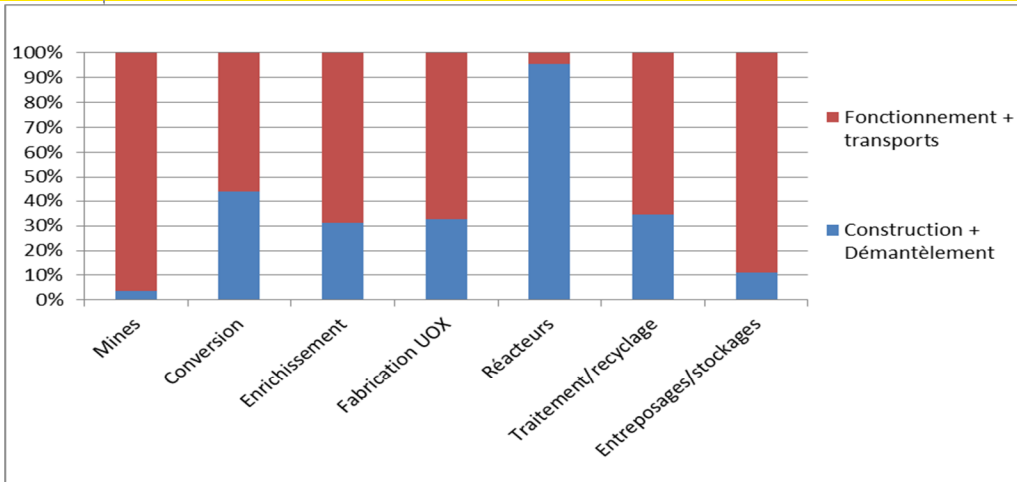


Cycle ouvert

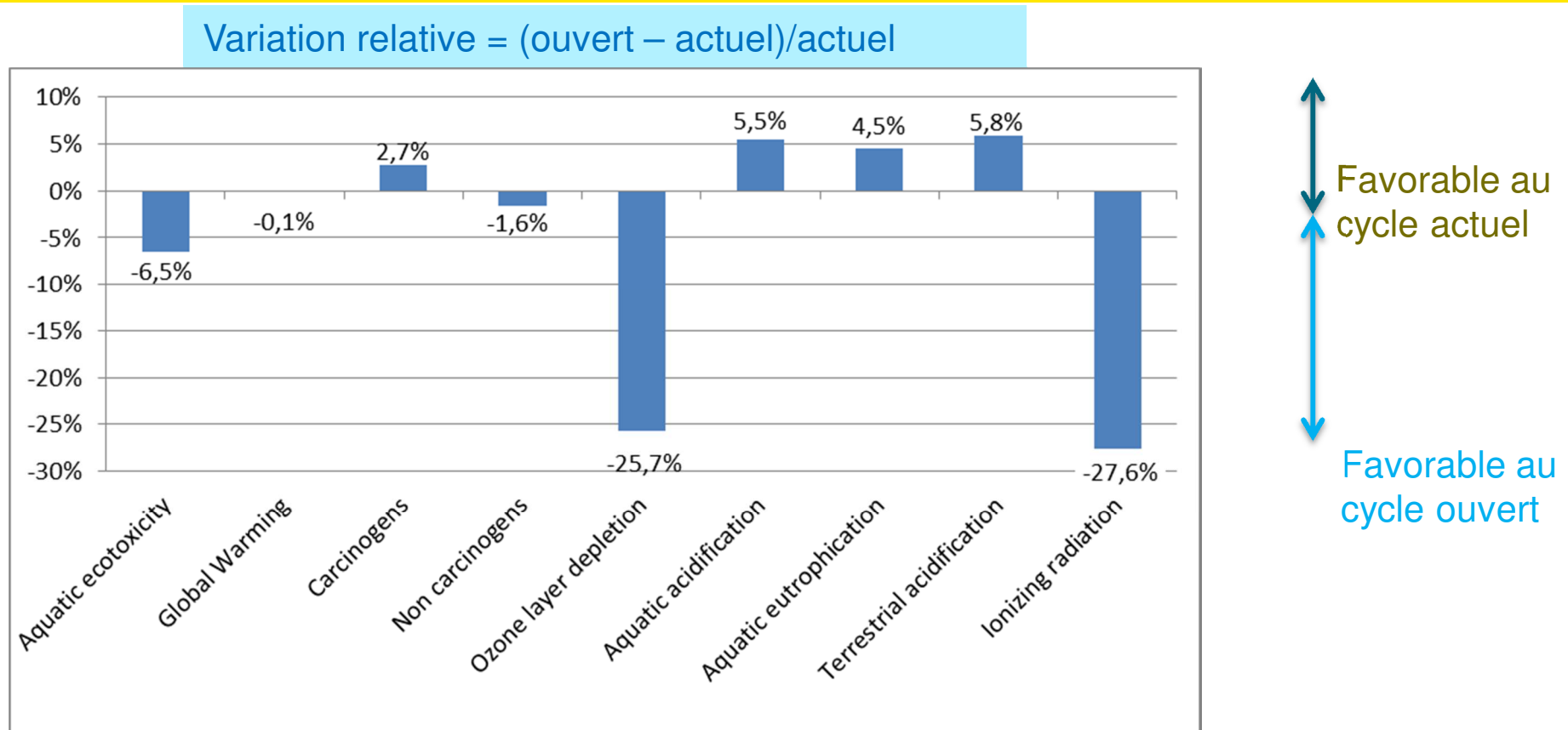
Avec ou sans rejets potentiels des résidus miniers



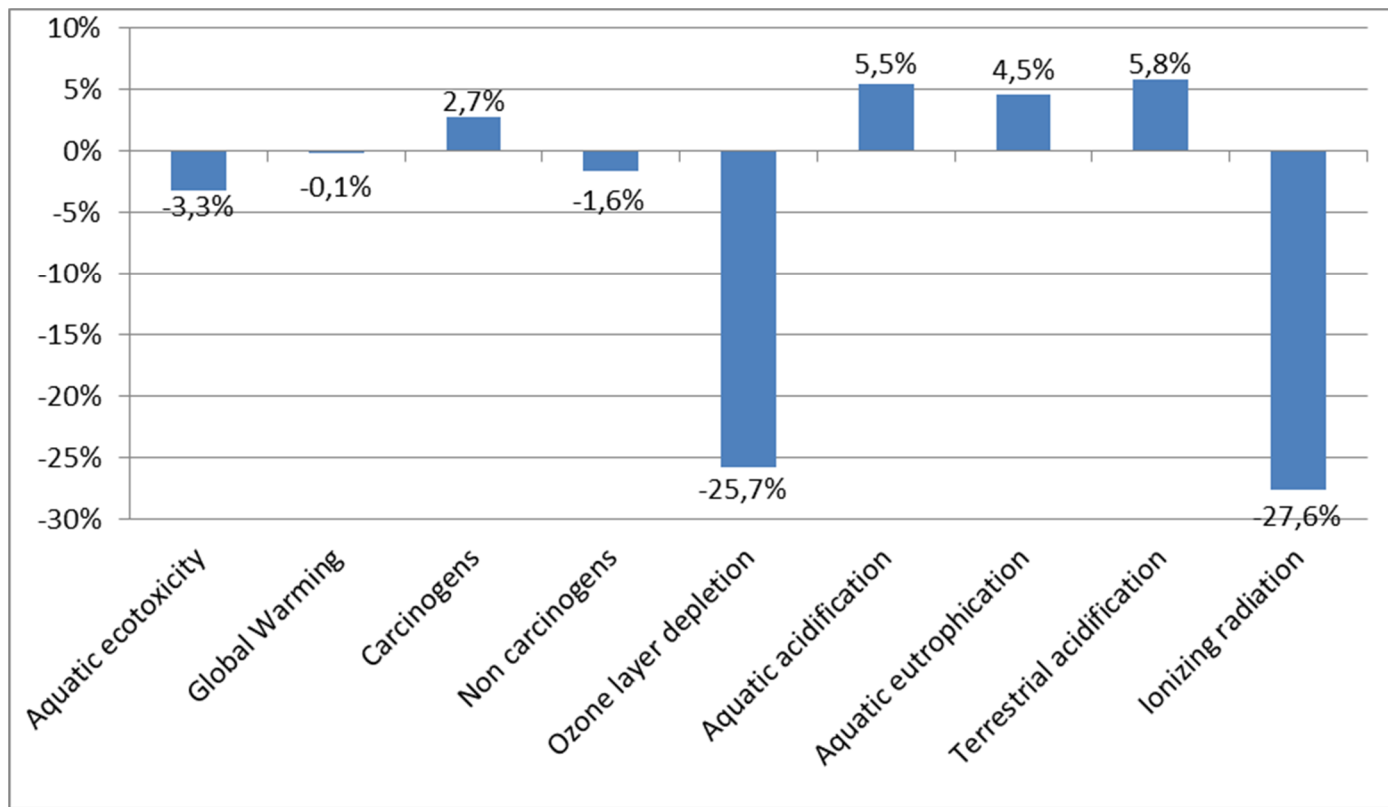
Contribution des étapes de vie des installations sur les impacts



Comparaison des deux scénarios (1/4)

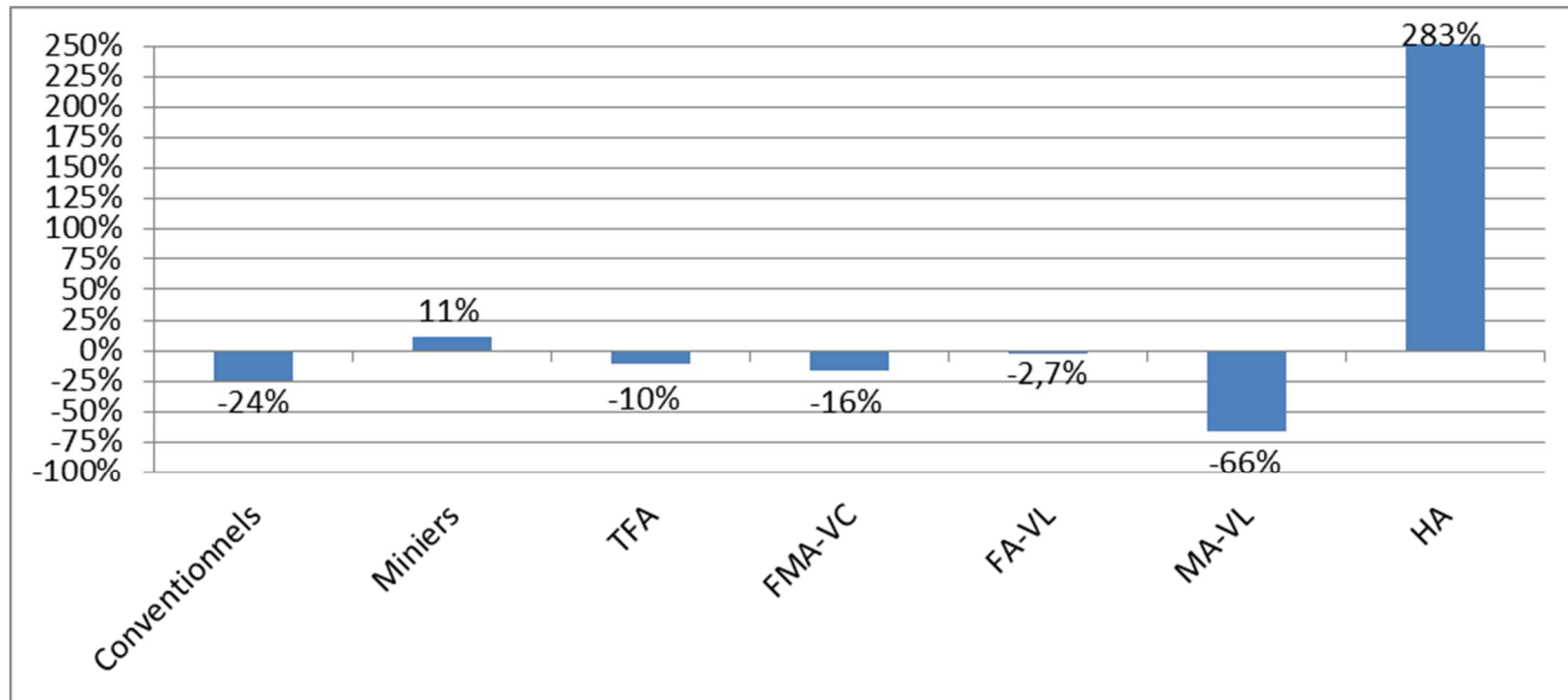


Comparaison des deux scénarios (2/4)

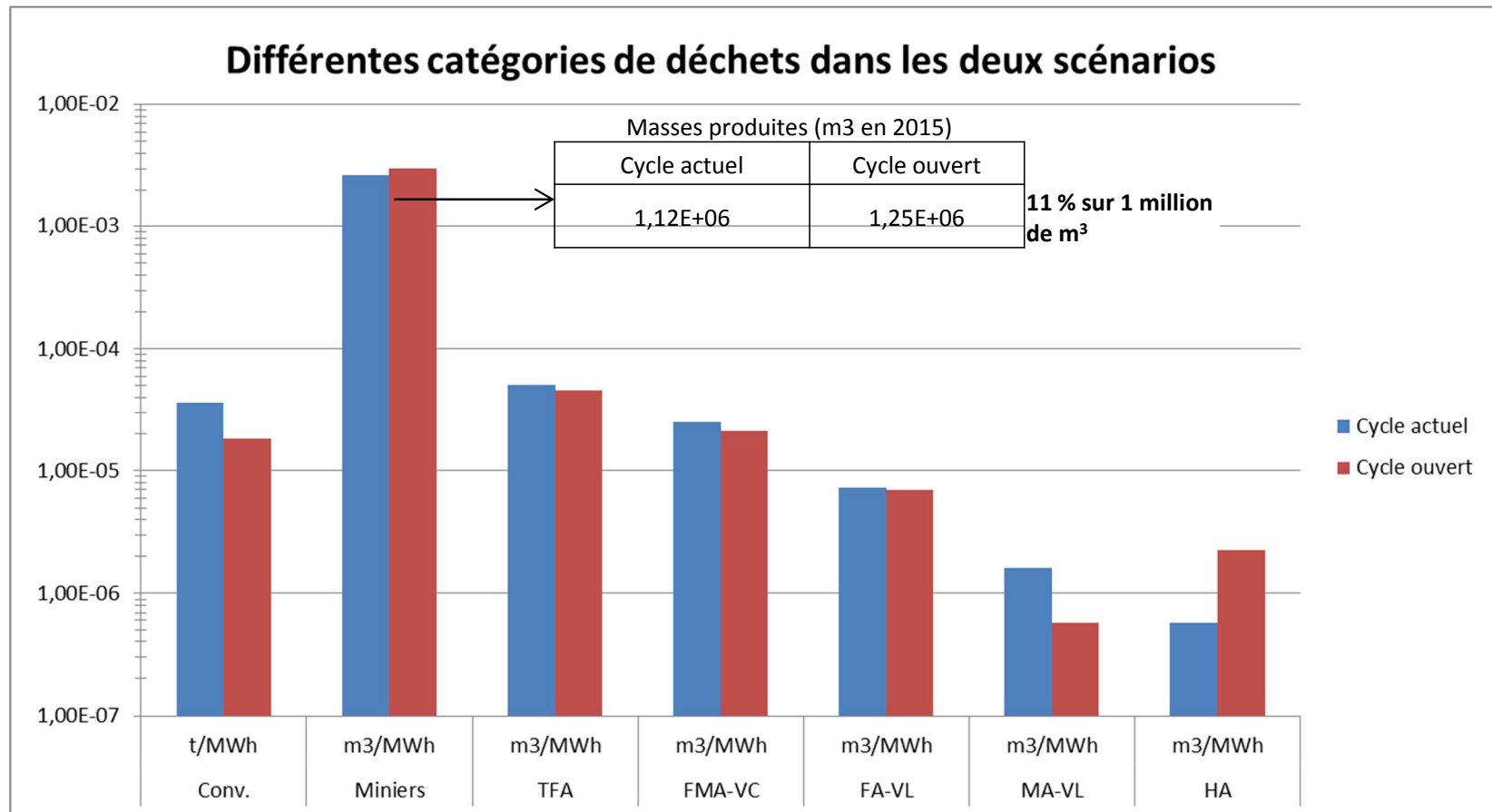


Les écarts sont identiques, sauf pour « aquatic ecotoxicity » : dû aux rejets aqueux des mines qui impactent plus le cycle ouvert que le cycle actuel

Comparaison des deux scénarios (3/4)



Données brutes sur les différents types de déchets



Attention, échelle logarithmique

Valeurs numériques

1. Catégories IMPACT2002+

		Avec rejets		
		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%

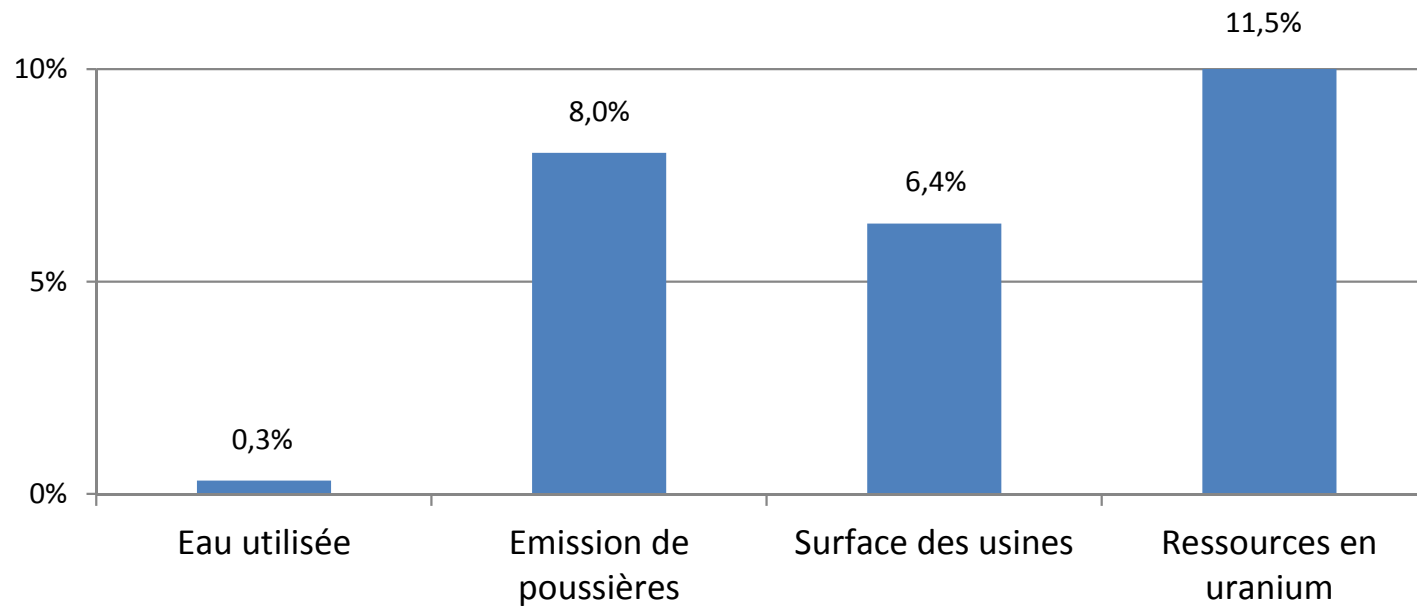
		Sans rejets		
		Total cycle actuel	Total cycle ouvert	Ecart relatif
		4,033E-01	3,772E-01	-6,5%
		3,723E-03	3,718E-03	-0,1%
		5,979E-05	6,141E-05	2,7%
		5,867E-05	5,774E-05	-1,6%
		1,387E-08	1,03E-08	-25,7%
		5,546E-05	5,850E-05	5,5%
		1,240E-06	1,297E-06	4,5%
		1,378E-04	1,459E-04	5,8%
		1,914E-01	1,386E-01	-27,6%

2. Déchets

		Sans rejets		
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		2,260E-06	2,811E-06	24%

Comparaison des deux scénarios (4/4)

Comparaison de quelques autres indicateurs entre le cycle actuel et un cycle ouvert



Discussion sur l'interprétation des valeurs numériques

Sources d'incertitude :

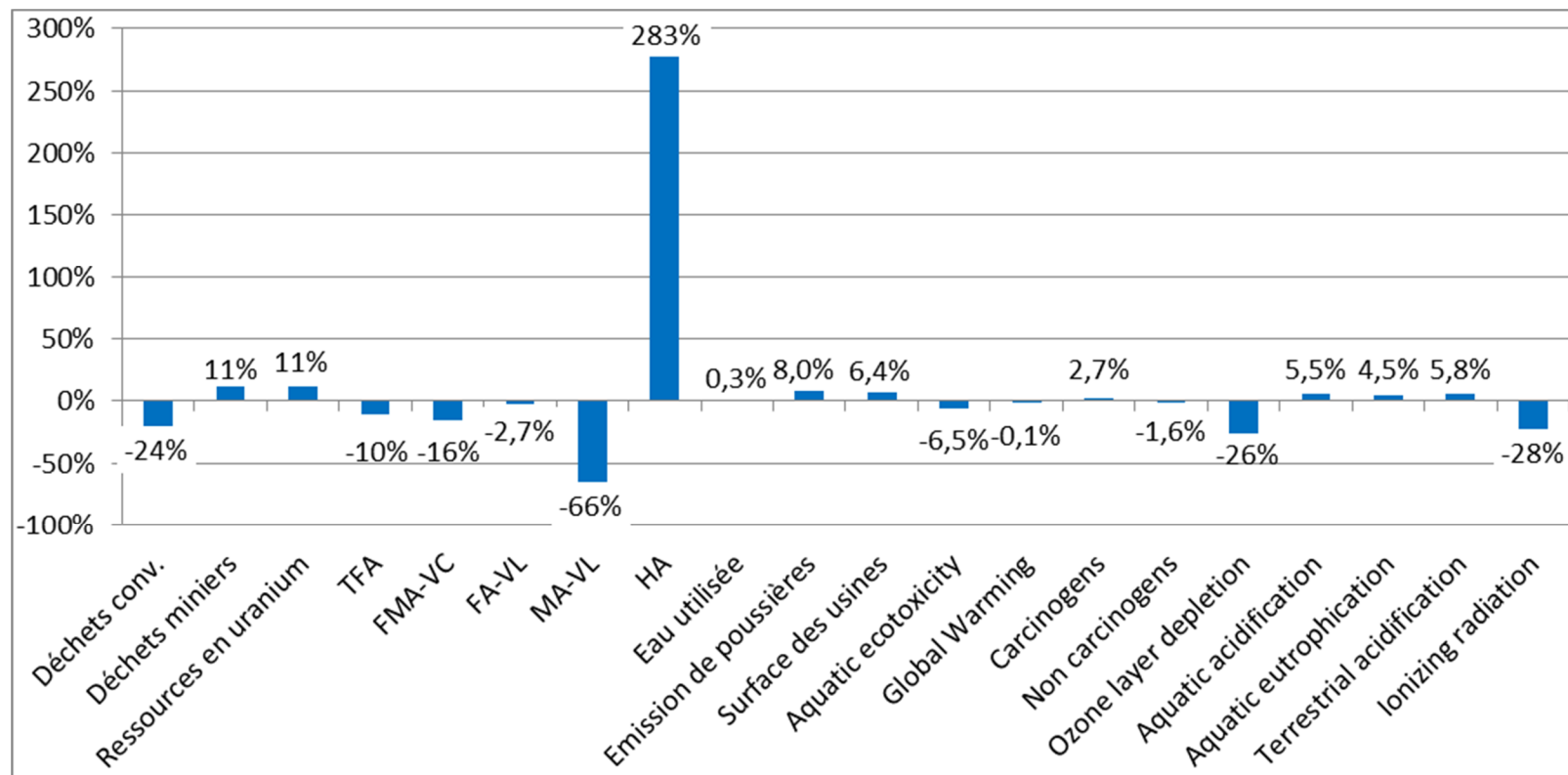
- ❖ Variation de la production des réacteurs (416,8 TWh en 2015 > 384 TWh en 2016 ; sur les 10 dernières années : 370 à 420 TWh/an) → résultats rapportés au MWh
 - ❖ **Facteurs de caractérisation** parfois manquants dans les méthodes (plusieurs radioéléments, poussières métalliques, polluants chimiques) → non pris en compte ou choix justifié d'analogues → importance de la traçabilité
 - ❖ **Matériaux de construction et énergie associée** : de nombreuses valeurs ont été estimées ; profondeur d'inventaire parfois variable entre installations, dépendante de l'accessibilité des données par entité et de la ressource à y consacrer (délais)
- impact potentiel sur la contribution relative des usines au résultat final dans les différentes catégories

Ces incertitudes restent a priori sans effets majeurs sur le différentiel entre les deux scénarios lorsqu'elles se retrouvent sur des installations présentes des 2 côtés de la modélisation

- Distorsion possible lorsqu'elles concernent des installations présentes dans l'un des cycles étudiés

Discussion

Les écarts pour les différentes catégories sont généralement faibles, sauf pour les catégories « Ionizing radiation » et « déchets » (notamment les HA). Par comparaison, le cycle ouvert conduirait à une très forte augmentation des déchets HA, alors que le cycle actuel est pénalisé par les déchets MA
Seuls quelques effets des incertitudes ont été estimés par sensibilité



MERCI DE VOTRE ATTENTION