

Analyse comparée du bilan environnemental du cycle électronucléaire français et d'un cycle ouvert

12^{ème} Congrès national de Radioprotection
La Rochelle 20/06/2019

D. Hartmann ⁽¹⁾, F. Brun ⁽²⁾, F. Laugier ⁽³⁾, D. Le Boulch ⁽⁴⁾, G. Senentz ⁽⁵⁾



- (1) : CEA Marcoule, DEN/DMRC/SA2I
- (2) : Orano Direction HSE-ENV
- (3) : EDF Direction du Combustible
- (4) : EDF R&D
- (5) : Orano R&D

Sommaire

- 1. Démarche de l'étude**
Contexte, méthodologie, Indicateurs
- 2. Principaux résultats**
- 3. Indicateur ACV radioéléments**
Discussion

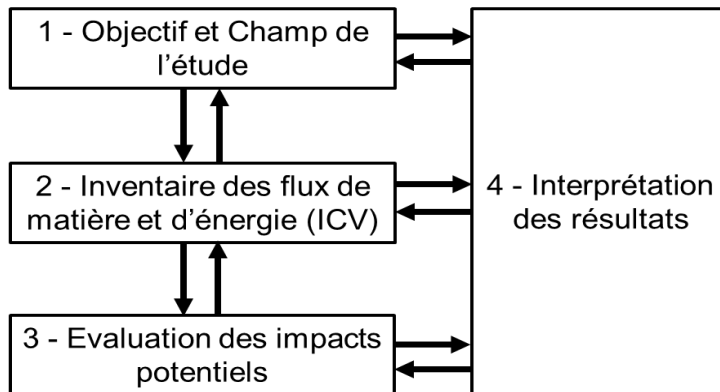
Contexte et méthodologie

Objectif de l'étude

Dans le cadre du PNGMDR

Analyse comparée du bilan environnemental du cycle électronucléaire français et d'un cycle ouvert

→ Décliné sous la forme d'une Analyse du cycle de vie (ACV)



Norme ISO 14040

Echanges et étude partagée avec les associations environnementales, organisés par la DGEC

Champ de l'étude

Monorecyclage Pu (cycle actuel, sans recyclage URT) vs. Cycle ouvert (hypothétique)

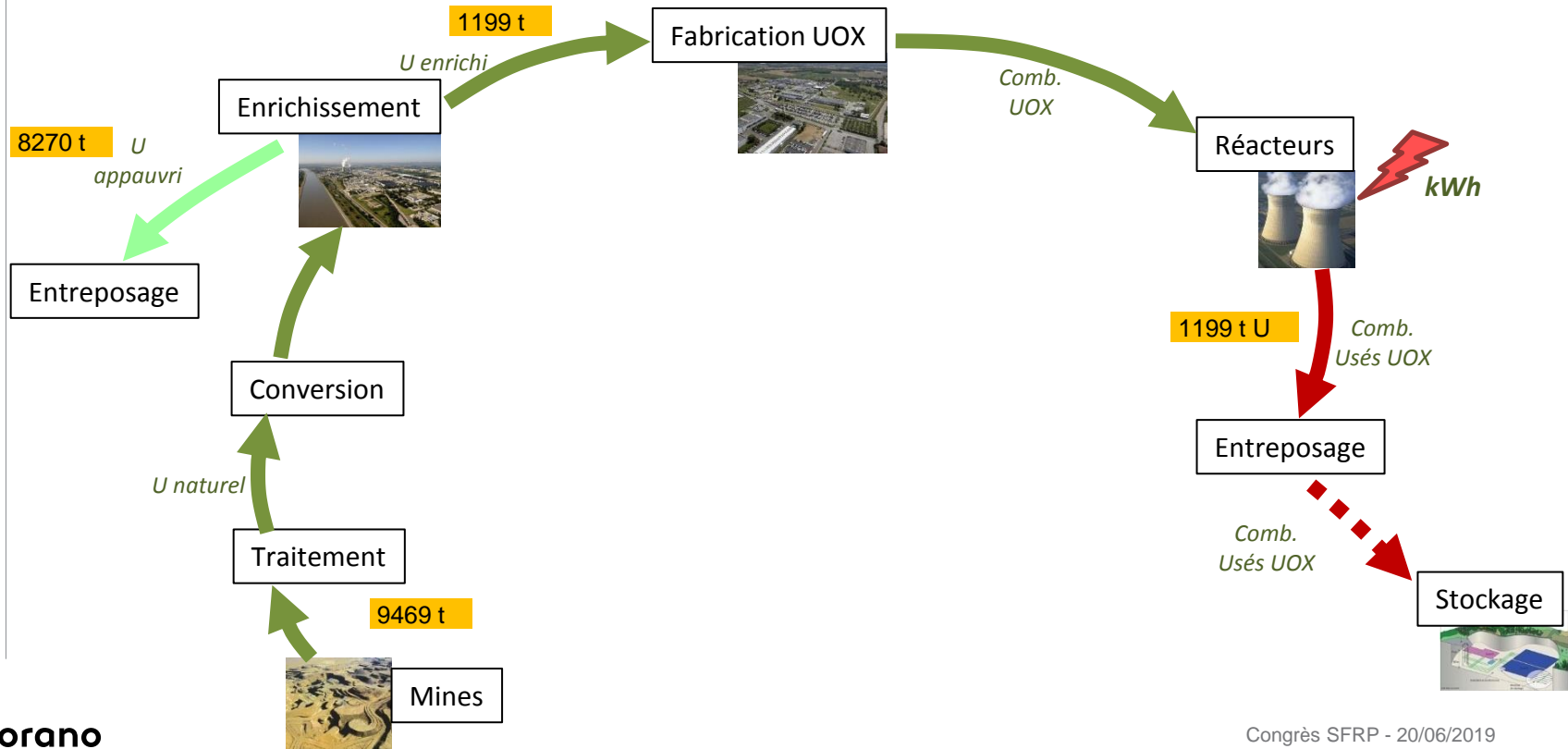
Système électronucléaire français, avec 58 réacteurs REP dont 24 moxés

- ❖ Réacteurs : parc nucléaire actuel d'EDF 63,2 GWe, 400 TWh/an
- ❖ Mines et usines du cycle et les transports intersites associés, y compris les stockages actuels et futurs (CIGEO)
- ❖ Pour des raisons pratiques d'accès aux données,
Utilisation des données d'inventaires d'installations Orano équivalentes

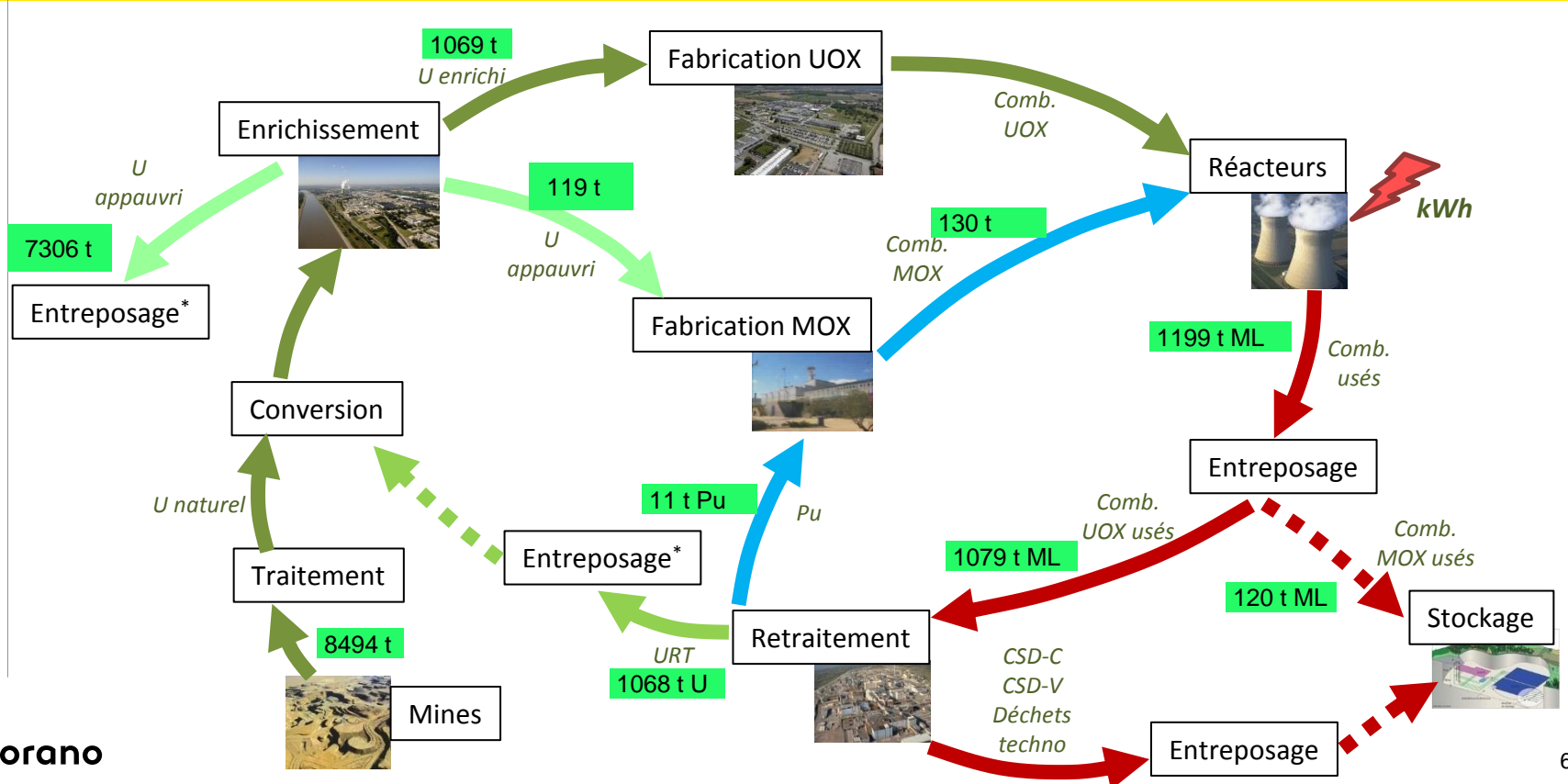
Calcul des flux de matières et déchets des deux scénarios

- ❖ Systèmes à l'équilibre
- ❖ Cycle de vie de chaque installation
 - Prise en compte des étapes de construction, production, assainissement/démantèlement
- ❖ L'ensemble des installations est alimentée par le mix électrique français actuel
 - Impact significatif sur le bilan de certaines installations, GBII en particulier

Cycle ouvert (hypothétique)



Monorecyclage Pu: Recyclage URT et Uapp non considéré



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 de combustibles UOX
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 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 centre FA-VL	<i>concept à l'étude, non modélisable pour l'ACV</i>
	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

À créer

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 (détail par catégorie)	Volume produit et m ² d'emprise de stockage ANDRA

Constitution des Inventaires

- ❖ 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

❖ Exemple des 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
Les volumes excavés, les emprises, l'énergie utilisée ont été estimés

❖ 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 plus poussée, incompatible avec les délais de l'étude, 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

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 réalisées sur 8 étapes du cycle nucléaire français, expertisées par la communauté internationale des radioprotectionnistes

Dreicer M. et al., ExternE: Externalities of energy, vol. 5 Nuclear, CEPN, EUR 16524 EN (1995), 340 p.

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	

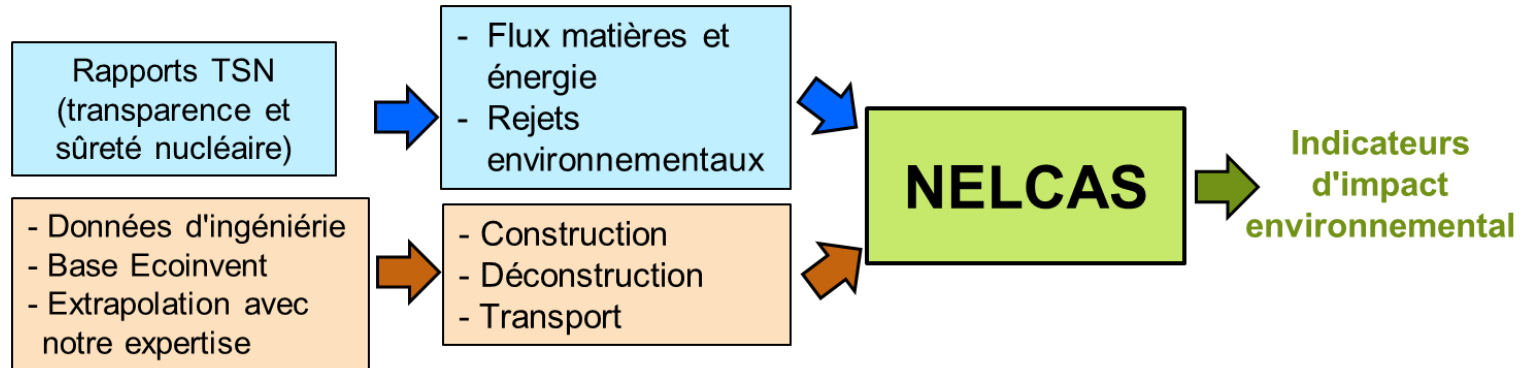
→ Référence = 1

Bq C14 eq/Bq de radioélément considéré

NELCAS : un outil développé par le CEA

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

Nuclear Energy Life Cycle Assessment Simulation (NELCAS)



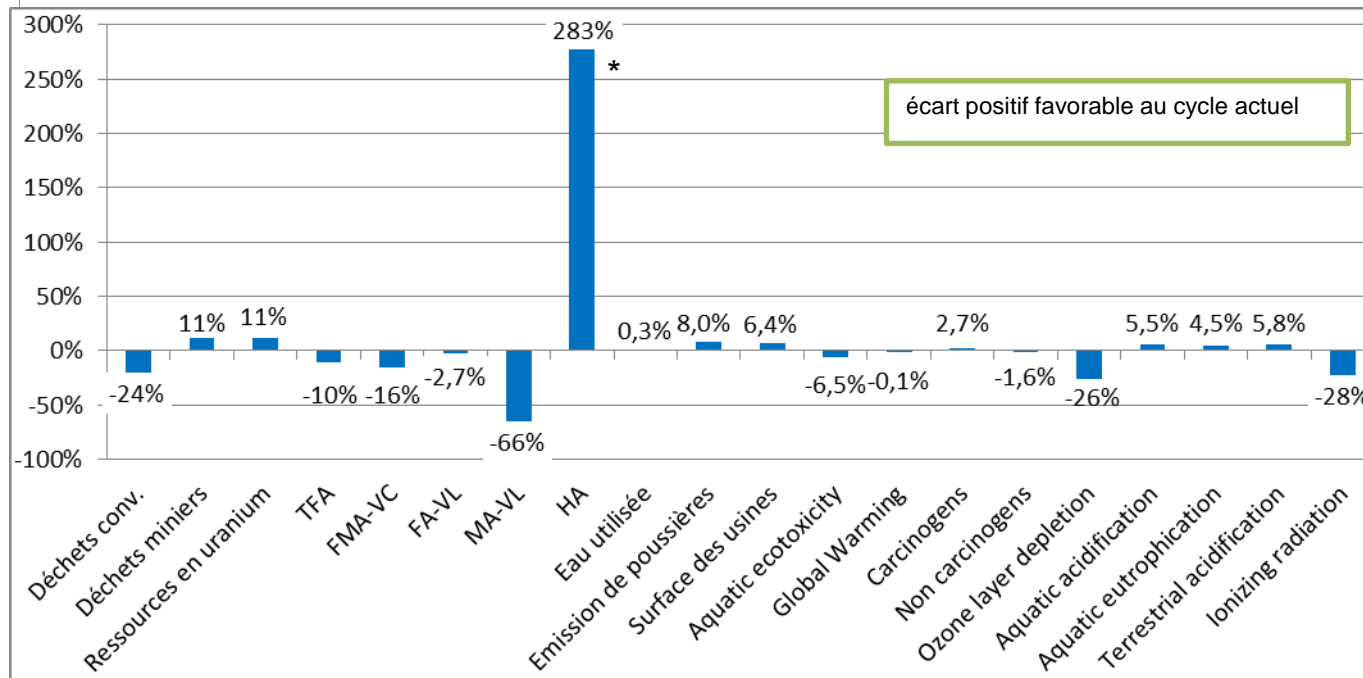
Poinsot, C. et al. (2014), "Assessment of the environmental footprint of nuclear energy systems. Comparison between closed and open fuel cycles." [Energy](#) 69: 199-211

- Intérêt de l'outil :

- ✓ maîtrise complète des données (plutôt que de sélectionner des fiches sans en connaître les sources ou les hypothèses)
- ✓ une fois la base de données des usines saisie, possibilité de faire varier facilement les scénarios (dessin et génération du scénario)

Résultats

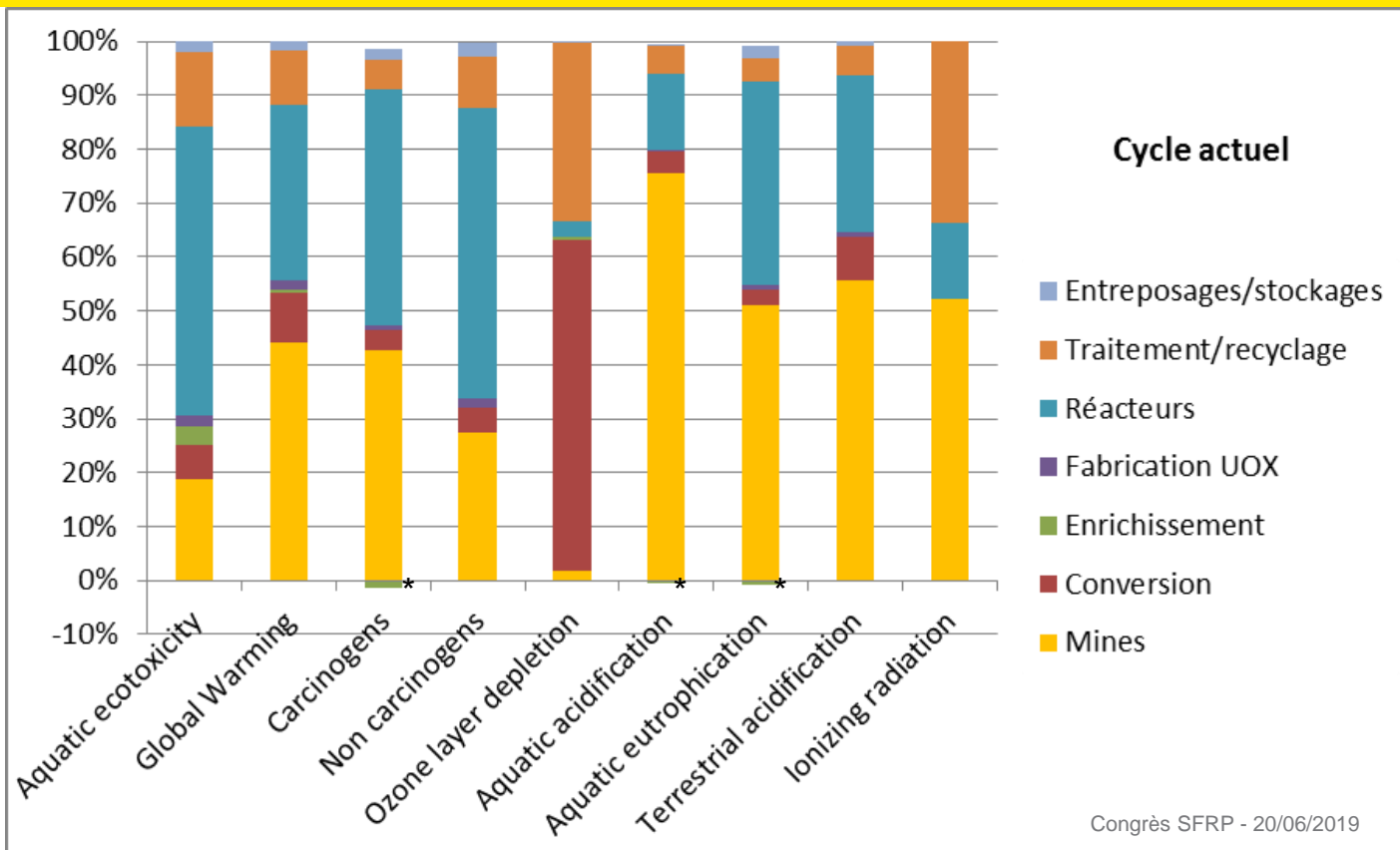
Les écarts pour les différentes catégories sont généralement faibles, sauf pour les catégories « Ionizing radiation » et « déchets » (notamment les HA). Par comparaison, le cycle ouvert conduirait à une très forte augmentation des déchets HA, alors que le cycle actuel est pénalisé par les déchets MA-VL.



Variation relative =
(ouvert –
actuel)/actuel

* HA + MA-VL: +24%

Contribution des différentes étapes du cycle actuel



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

Calcul d'impact radiologique (en MBq C14 équivalent) 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 »
→ ce qui revient à considérer que tous les FC manquants sont du même ordre de grandeur que ceux connus

Exemple 1 : Rejets gazeux pour 1 réacteur de 900 MW

- 3 principaux contributeurs : 3H, 133Xe, 14C
- Quelques RN possédant une activité importante n'ont pas de FC : 135Xe, 131mXe (E+04 MBq/an)
- Taux d'activité renseigné : 91 %
- Dans ce cas, la correction est faible : l'impact estimé passe de 1,5 E+05 à 1,65 E+05 MBq C14eq/an (+ 10 %)

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

Discussion concernant la prise en compte des rayonnements ionisants en ACV

- ❖ CO₂ vs. Rayonnements ionisants
 - Pondération géographique pour les FC, effet global vs. effet local (facteur de dispersion des rejets et densité de population environnante...différents en zone peuplée ou inhabitée)
 - Comportement des espèces chimiques (ex : rejets dans l'eau → espèce soluble ou non, ³H organique ou non...)
- ❖ Prise en compte de la temporalité (rejets dans 100 000 ans vs. maintenant)

- ❖ Groupe de travail à instaurer pour analyser et compléter les travaux existants, associant radioprotectionnistes et praticiens de l'ACV ?

MERCI DE VOTRE ATTENTION

