

HOGERE ZEEVAARTSCHOOL ANTWERPEN

Propulsion nucléaire :
Une alternative durable à la propulsion
conventionnelle ?

DE BIE Alexis

Thèse présentée pour l'obtention
du titre de
Master en Sciences Nautiques

Promoteur : Geert Potters
Co-promoteur : Carine Reynaerts
Année académique : 2019 – 2020

Avant-Propos

Dans un monde toujours à la recherche de l'évolution technologique et de son optimisation, l'énergie est un facteur clé. Sa production, son transport ainsi que sa consommation ne cesse d'augmenter depuis le XVIII^{ème} siècle. Chaque découverte faite par l'Humanité a permis à celle-ci de continuer à croître jusqu'à l'ère du digital que nous connaissons aujourd'hui.

Afin de pouvoir subvenir à ses besoins énergétiques, l'Humanité a développé une multitude de procédés différents, repoussant chaque fois la limite de ses connaissances.

Ces dernières années, beaucoup d'interrogation subsiste sur la modification du climat, les gaz à effet de serre, les métaux lourds, particules fines ou toutes autres substances pouvant polluer notre environnement.

A l'ère du digital, l'énergie nucléaire est très répandue dans le monde et depuis son invention, il fut construit plus de réacteurs nucléaires en mer que sur la terre ferme (cf mémoire).

La question se pose donc d'elle-même :

Quel est l'impact d'un navire à propulsion nucléaire sur l'environnement et est-il plus ou moins écologique qu'un navire à propulsion au fuel lourd ?

Je voudrais remercier le Docteur Carine Reynaerts et le Docteur Geert Potters, professeurs de la « Hogere Zeevaartschool, Antwerpen » de m'avoir conseillé durant deux années consécutives, pour mon mémoire et maintenant ma thèse. Grâce à eux j'ai compris que mon intérêt se trouve à la croisée des chemins entre la mer, l'écologie et le progrès de la production des énergies.

Je voudrais remercier également toute une communauté de personnes, qu'il serait impossible à tous citer ici. Ceux-ci m'ont permis de gagner confiance et détermination dans l'accomplissement de mes objectifs.

Résumé

La combustion de carburants fossiles dont l'Humanité dépend encore majoritairement aujourd'hui engendre la production de grandes quantités de gaz polluants, mais également des gaz à effet de serre ayant des effets écologiques et sanitaires néfastes. Ces gaz sont en partie responsables du réchauffement climatique. Afin de respecter une augmentation de +2°C par rapport à l'ère préindustrielle d'ici l'horizon 2050, une grande quantité de solutions de production d'énergie alternatives aux énergies fossiles ont vu le jour comme l'hydroélectrique, éolien, solaire, etc.

C'est également le cas au sein de la marine marchande. Celle-ci est responsable à hauteur d'environ 3% des émissions mondiales de gaz à effet de serre pour une quantité estimée en 2012 de 961 millions de tonnes de CO₂e (CO₂équivalent combine CO₂, CH₄, NO₂) par an. Cette production de CO₂e n'est valable que pour l'utilisation de carburant fossile et non pour tout son cycle de vie.

La propulsion nucléaire est une technologie que nous maîtrisons déjà et qui est capable d'apporter une solution quant aux émissions de gaz à effet de serre. Malheureusement la propulsion nucléaire n'est que peu utilisée aujourd'hui, exceptée plusieurs navires militaires, brise-glaces et pétrolier opérant dans l'océan arctique.

Contrairement à l'utilisation de carburant fossile, l'énergie nucléaire ne produit pas de gaz à effet de serre à l'utilisation. Cette dernière affirmation n'est plus vraie quand on regarde tout le cycle de vie du combustible nucléaire. Dépendant des études menées, durant tout le cycle du combustible nucléaire, la valeur gaz-énergie serait entre 10-130 g CO₂e/kW_{el}.

Pour comparer, le charbon, une des énergies fossiles les plus polluantes, cette valeur s'élève à 820 g CO₂e/kW_{el}.

Le potentiel de réduction des gaz à effet de serre que pourrait apporter l'énergie nucléaire est non négligeable. Nous allons tenter de savoir s'il est possible de remplacer la propulsion conventionnelle par la propulsion nucléaire de manière durable.

Abstract

The combustion of fossil fuels on which humanity is still mainly dependent produces large quantities of pollutants and greenhouse gases with harmful effects on ecology and health. These gases are partially responsible for global warming. In order to meet an increase of +2°C compared to the pre-industrial era by 2050, a large number of alternative energy production solutions to fossil fuels have been developed such as hydroelectric, wind power, solar power, etc.

This is the case in the Merchant Navy. It is responsible for approximately 3% of global greenhouse gas emissions with an estimated quantity in 2012 of 961 million tonnes of CO₂e (CO₂ equivalent is combination of CO₂, CH₄, NO₂) per year. This CO₂e production is only valid for the use of fossil fuel and not for its entire life cycle.

We already master nuclear propulsion technology, which provides a solution for greenhouse gas emissions. Unfortunately, nuclear propulsion is still little used outside of military ships, icebreakers or few tankers operating in the Arctic Ocean. Unlike fossil fuel, nuclear power does not generate greenhouse gases. This is no longer true if we consider the entire life cycle of nuclear fuel. Studies have shown that the ratio of gas emitted by energy produced over the entire nuclear fuel cycle is between 10 and 130 gCO₂e/kWh. Compared to coal, which is one of the most polluting fossil fuels, this value is 820 CO₂e/kWh.

The greenhouse gas reduction potential that nuclear energy could contribute is significant. We will investigate whether it is possible to replace conventional propulsion with nuclear propulsion in a sustainable way.

Table des matières

Chapitre 1 : Contexte général : La problématique de la propulsion conventionnelle.....	1
Chapitre 2 : La solution de la propulsion nucléaire.....	5
2.1 Historique de la radioactivité	5
2.2 Notion importante de la radioactivité	7
2.2.1 La demi-vie	7
2.2.2 Unité de mesures	8
2.3 Influence de la radioactivité sur le corp Humain.....	10
2.4 Les déchets	10
2.5 Historique d'un accident impliquant un sous-marin nucléaire.....	13
2.5.1 Description du navire	14
2.5.2 Le naufrage.....	15
Chapitre 3 : Question de recherche – Est-il possible de remplacer le fuel lourd par des matières fissiles ?	18
Chapitre 4 : Propulsion et économie.....	19
4.1 Pourquoi les navires utilisent t'ils la propulsion nucléaire ?.....	19
4.2 Conception d'un navire à propulsion nucléaire par rapport à un navire conventionnel.....	21
4.2.1 Moteur à propulsion conventionnel	23
4.2.2 Moteur à propulsion nucléaire	23
4.3 Carburant marin et matière fissile.....	27
4.3.1 Carburant marin conventionnel.....	27
4.3.2 Matière fissile	30
4.4 Autonomie	34
Chapitre 5 : Ecologie.....	35
5.1 Problématique des émissions de la combustion conventionnelle.....	35
5.1.1 Les gaz à effet de serre.....	35
5.1.2 Emission de substance acidifiante	38
5.1.3 La suie et particules fines	40
5.2 Réglementations et solutions actuelles	42
5.3 Emission de la réaction nucléaire	47
5.3.1 Le renflouement du Kursk.....	50
5.3.2 Le démantèlement et conséquence du naufrage	53
5.4 Gestion des déchets en fin de vie.....	53

Chapitre 6 : Analyse de cycle de vie du combustible nucléaire	58
6.1 Objectif de l'étude	59
6.2 Bilan matière - énergie	60
6.3 Analyse des impacts	66
6.4) Interprétation des résultats.....	70
Chapitre 7 : La propulsion nucléaire, une solution aux émissions de la propulsion conventionnelle ?	72
7.1 Discussion	72
7.2 Conclusion	74
Bibliographies	73
Annexe.....	79
Annexe A : Réglementation MARPOL	79
Annexe B : Schéma cycle de vie écologique.....	86
Annexe C : Deux méthodes de lessivage de l'uranium	87

Liste des figures

Figure 1	Consommation d'énergie par source jusqu'en 2035.....	2
Figure 2	USS Nautilus.....	6
Figure 3	Evolution du nombre d'atomes radioactifs en fonction du temps.....	7
Figure 4	Compteur Geiger.....	8
Figure 5	Effets des rayonnements ionisants.....	9
Figure 6	Symbole du système harmonisé de classification et d'étiquetage indiquant un produit chimique sensibilisant, mutagène, cancérigène ou reprotoxique.	10
Figure 7	K-141 Kursk en cale sèche après l'accident	13
Figure 8	Schéma général de la conception des sous-marins de la classe Oscar II.....	15
Figure 9	Image représentant le Kursk en position verticale.....	16
Figure 10	Graphique représentant le % d'émission de CO ₂ de plusieurs activités Humaine	19
Figure 11	Navire brise-glace Lénin	20
Figure 12	Variation de la valeur nette des coûts des cycles de vie entre différents modes de propulsion.	21
Figure 13	Schéma d'un moteur à propulsion conventionnel.....	23
Figure 14	Schéma d'un moteur nucléaire à eau pressurisé.....	24
Figure 15	Représentation simplifiée de la distillation du pétrole brut.....	28
Figure 16	Chaîne de désintégration de l'uranium 235.....	30
Figure 17	Fonctionnement des centrifugeuses à gaz.....	32
Figure 18	Procédé d'enrichissement en cascade.....	33
Figure 19	Représentation de la fonction de l'effet de serre.....	35
Figure 20	Représentation du procédé d'acidification de l'environnement.....	38
Figure 21	Variation du pH à la surface des océans entre 1700 et 1990	39
Figure 22	Classement des polluants atmosphérique selon leur taille	40
Figure 23	Carte en temps réel (2020, Mai 19 – 12h51) de la pollution atmosphérique aux particules fine.....	41
Figure 24	Capture d'écran (2020, Mai 21) du trafic maritime civile.....	42
Figure 25	Graphiques de la répartition des déchets en fonction du volume et du niveau de radioactivité.....	49
Figure 26	Vue depuis un ROV sur le câble de découpe	51
Figure 27	Projet de découpage du Kursk par la société Hollandaise Mammoet.....	51
Figure 28	Barge ayant permis le renflouage du Kursk	51
Figure 29	Installation des câbles de traction sur la coque du sous-marin.....	51
Figure 30	Barge de levage entrant dans la cale flottante destinée à accueillir le Kursk.	52
Figure 31	Archive de la commémoration du Kursk après le renflouage.....	52
Figure 32	Piscine de stockage des matières fissiles irradiées	54
Figure 33	Extraction de la tranche réacteur d'un SNLE, avant d'être ressoudée	55
Figure 34	Cycle de vie de la matière fissile	60
Figure 35	Comparaison de plusieurs cycles de vie du carburant nucléaire.....	61
Figure 36	Energie requise pour l'étape du fraisage dépendant du grade de l'uranium....	63
Figure 37	Résultat de l'opération de fraisage.	64
Figure 38	Brise-glace nucléaire Yamal.....	67
Figure 39	Evolution de la consommation en carburant en tonnes par jours en fonction de la vitesse	68
Figure 40	Schéma de fonctionnement d'un scrubber.....	84
Figure 41	Cartes des zones ECA	85
Figure 42	Schéma de principe de la méthode ACV EcoIndicator 99.....	86

Liste des tableaux

Tableau 1	Activité Radioactive	11
Tableau 2	Classement des déchets radioactifs selon leurs activités et leurs demi-vies	11
Tableau 3	Facteurs de multiplication pour les tanks, conteneurs, déchets radioactifs et matériel contaminé	12
Tableau 4	Catégories d'emballages, suremballages et conteneurs.....	13
Tableau 5	Spécification générale du Kursk Source : Travail personnel adapté de Projet 949A Antey/Oscar II (Pike, 2000)	14
Tableau 6	Comparaison des masses à bord d'un navire à propulsion conventionnel et un navire de type SMR	26
Tableau 7	Composition des différents fuel marin liquide	29
Tableau 8	Comparaison des performances de différents mode de propulsion pour les sous-marins	34
Tableau 9	Concentration passées (avant 1750) et actuelles des principaux gaz à effet de serre.....	37
Tableau 10	Comparaison des quantités de CO2 entre le transport maritime et production mondiale (valeurs en millions de tonnes)	44
Tableau 11	Performance de la réduction des émissions dépendant de la technologie.....	47
Tableau 12	Energie spécifique requis pour l'extraction d'une tonne d'uranium dépendant de sa concentration.....	62
Tableau 13	Energie spécifique requis pour le fraisage d'une tonne d'uranium dépendant de son grade	63
Tableau 14	Energie requise pour l'enrichissement de l'uranium	65
Tableau 15	Energie requise pour la préparation du combustible nucléaire	66
Tableau 16	Récapitulatif des émissions de CO ₂ estimée par an pour un navire ayant une puissance de 55,3 MW.	71
Tableau 17	Classement des navires en fonction des émissions de NOX et année de construction	82

Chapitre 1 : Contexte général : La problématique de la propulsion conventionnelle

Comme nous le savons tous, la combustion d'énergie fossile (pétrole, charbon, gaz, etc.) est massivement utilisée aujourd'hui pour la production d'énergie, le transport ou encore pour divers procédés de fabrication.

Ces énergies ont plusieurs avantages et inconvénients comme en attestent de nombreux rapports et articles (BP, 2019) (Stanislav, 2015) (Dufour, 2018) (Tissot, 2002) :

- Le charbon a l'avantage d'être réparti équitablement de manière générale autour du globe. Ses désavantages majeurs, le coût de l'extraction ainsi que la forte pollution liée à son utilisation.
- Le pétrole, de la même façon que le charbon est relativement accessible partout sur Terre. Son rendement énergétique en fait la substance la plus utilisée à l'heure actuelle. Il permet également la conception d'une grande quantité de biens manufacturés dont l'Humanité ne peut pas encore se passer. Parmi ses inconvénients majeurs, il est très polluant, le cours en bourse du pétrole est très fluctuant dépendant de la demande mondiale et il est à l'origine de beaucoup de conflits dans le monde.
- Le gaz naturel a comme avantages majeurs, son abondance, il ne requiert aucune transformation pour être utilisé, il est peu polluant à l'utilisation. Toutefois il est très polluant à l'extraction, le méthane aurait un effet de serre 30 fois supérieure au CO₂ et il est dangereux de le manipuler due au risque d'explosion.

Il est important de noter que l'uranium, composant majeure de l'exploitation de l'énergie nucléaire est également une énergie non renouvelable. Cependant le sujet de l'uranium sera abordé de plus ample manière au chapitre 4.

Il existe d'autres sources énergie, que nous appelons énergie renouvelable. Elles sont nommées comme tel, car leur renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées inépuisables sur l'échelle de temps humain (Kuo, 2015). Le graphique (Figure 1) représente la répartition moyenne en pourcentage de la consommation de tous types d'énergies dans le monde.

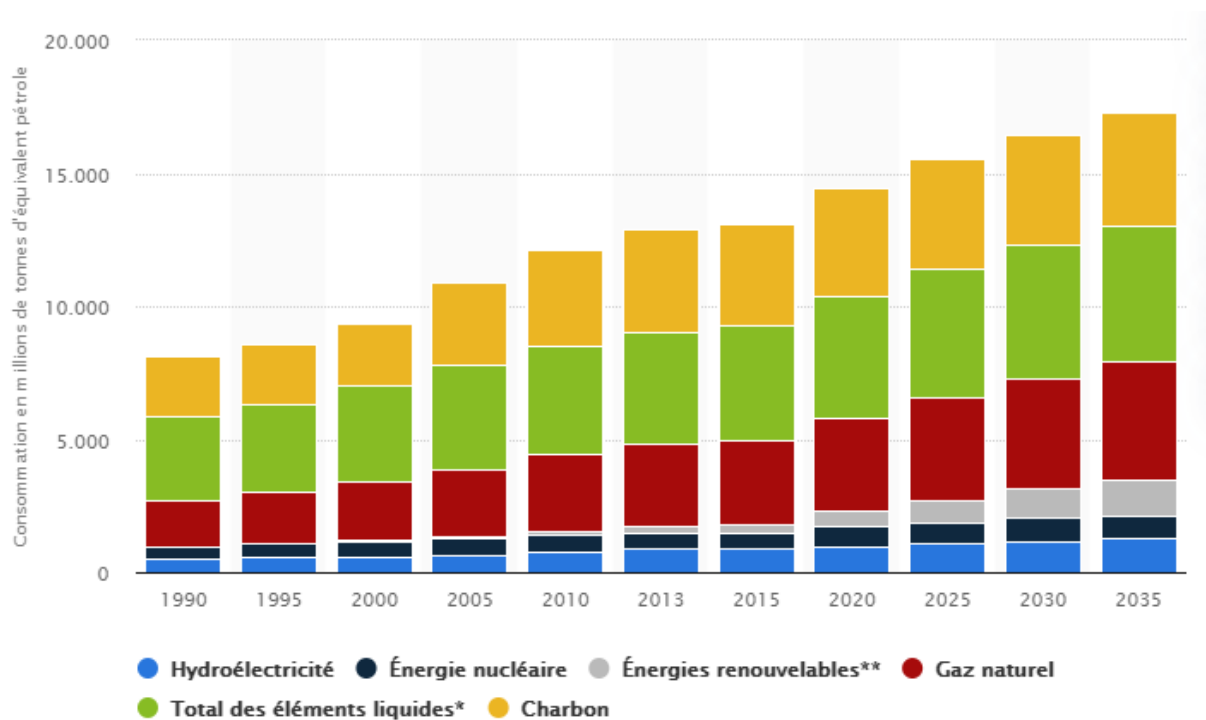


Figure 1 Consommation d'énergie par source jusqu'en 2035
Source : Statista (2020)

Au point de vue climatique, l'utilisation massive d'énergie fossile a un impact non négligeable bien que mal appréhendé encore à ce jour. Néanmoins, le graphique ci-dessus (Figure 1) ne nous montre aucune diminution évidente pour les années à venir. L'enjeu majeure de la diminution de l'utilisation des énergies fossiles est de lutter contre le réchauffement climatique par réduction des gaz à effet de serre. Nous sommes forcés de constater que la pollution atmosphérique est bien présente au vu de l'abondance des recherches scientifiques et de la consistance de leurs résultats. Un rapport émis par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) en 1987 mettait déjà en garde contre les dangers pour la santé liés à l'utilisation des différentes énergies. Ci-dessous, quelques exemples tirés de ce rapport. Ceci n'est évidemment pas une liste exhaustive (OMS, 1987) :

- Danger respiratoire et oculaire lié aux gaz d'échappement,
- Effet cancérigène des hydrocarbures aromatique cyclique, ...
- Effet psychologique et comportemental.
- Les propriétés mutagènes du rayonnement radioactif ou de certaines substances.

Une analyse parmi beaucoup d'autres menées durant l'année 2000 montrait une augmentation de la mortalité de 0,6% chez les personnes de plus de 65 ans due à une exposition aux gaz polluant de l'échappement (Kunzli, 2000). En plus des effets néfastes sur la santé, l'extraction et l'exploitation des énergies fossiles a également un impact écologique (Tissot, 2002). Extrait d'un rapport de 1994 de l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS), voici quelques effets de l'effet de l'utilisation de carburant fossile sur l'environnement (Landrieu, 1994) :

- Effet de serre et réchauffement climatique
- Accumulation de métaux lourds et destruction des biotopes
- Irradiation des zones de stockage des déchets nucléaires
- Pluie acide
- Acidification des sols et des océans

Les problèmes cités plus haut ne valent pas seulement pour la production d'énergie mais aussi pour le seul moyen que l'Homme a à sa disposition pour effectuer du commerce à grande échelle, la marine marchande. Comme en atteste un rapport sur l'impact de la pollution côtière dans la manche orientale. La marine marchande peut être directement reliée à une diminution du nombre d'espèces ainsi que la quantité d'individus vivants le long des zones côtières. (Amara, 2011).

La majorité des navires marchands naviguent grâce à une propulsion aux énergies fossiles (fioul lourd, diesel, gaz naturel) car aucune autre alternative ne s'est réellement avérée rentable.

Comme pour la production d'énergie, les navires produisent des gaz d'échappement produisant les effets cités plus haut. Ils sont néanmoins soumis à des règles strictes connues sous le nom de MARPOL 73/78 concernant la prévention de la pollution en mer. Une annexe de cette convention est directement liée à l'émission des gaz d'échappement (OMI, 2020).

Il existe toutefois une autre option à la propulsion aux énergies fossile. Il s'agit de la propulsion nucléaire. Le principe consiste à remplacer le moteur du navire par un réacteur nucléaire qui est capable de fournir l'énergie dont le navire a besoin. Le problème majeur lié à ce type de propulsion est la gestion des déchets irradiés du réacteur ainsi que la gestion des parties contaminées du navire quand celui-ci sera démantelé en fin de vie. Toutefois, un avantage majeur survient écologiquement parlant. Aucun gaz ayant un effet néfaste sur l'environnement n'est produit par l'utilisation directe de la propulsion nucléaire (Rousseaux, 2000) (Halvor, 2017) (Hirdaris et al, 2014).

Aujourd'hui, deux options de propulsions sont vraiment faisables. La propulsion conventionnelle, elle pollue fortement l'environnement durant son utilisation mais ne génère que peu de problèmes en fin de vie. Deuxièmement, la propulsion nucléaire, qui ne pollue pas durant son utilisation mais qui génère de gros problèmes avec la gestion des déchets irradiée à long terme (Halvor, 2017).

Ce sujet sera abordé en quatre différentes parties. Premièrement un bref rappel de ce qu'est la radioactivité, ainsi que c'est danger, afin d'introduire la deuxième partie. Celle-ci abordera de manière simplifiée, le fonctionnement d'un navire à propulsion nucléaire comparée à un navire à propulsion conventionnelle. Cela permettra de comprendre l'enjeu économique lié à l'utilisation de chaque mode de propulsion. Troisièmement, la problématique écologique lié à chaque de mode propulsion. Finalement, une estimation quantitative des émissions de gaz à effet de serre lié à ces deux modes de propulsion. Afin de pouvoir répondre à la question : « La propulsion nucléaire peut-elle remplacer la propulsion conventionnelle de façon durable quant à la réduction des gaz à effet de serre ? »

Chapitre 2 : La solution de la propulsion nucléaire.

2.1 Historique de la radioactivité

L'énergie nucléaire prend ses racines en 1896, lors d'une expérience sur la fluorescence des corps menée par Henri Becquerel. Son expérience consistait à faire noircir une plaque photographique grâce à du sulfate d'uranium, supposé fluorescent et qui avait été préalablement exposé au soleil. Si la plaque photo noircissait après que le sel fut exposé au soleil, cela signifiait que l'élément était fluorescent. Néanmoins, Becquerel découvrit que la plaque photographique noircissait même si le sel n'avait pas été préalablement exposé au soleil. Cela signifiait premièrement que le sulfate d'uranium n'était pas un élément fluorescent et deuxièmement qu'il émettait de lui-même un rayonnement particulier (Rousseau, 2015).

A partir de cette découverte, chaque année apporta son lot de découverte :

- 1899, Ernest Rutherford identifie trois types de rayonnement différent nommé : alpha, bêta et gamma. Ce dernier fut découvert par Paul Ulrich Villard.
- 1900, Marie Curie, de son vrai nom Skoldowska Curie, découvrit un autre élément émettant ce type de rayonnements : le radium, et détermina sa masse atomique. Elle découvrit également le polonium. Elle est l'inventrice du mot radioactivité.
- Entre 1913 et 1928, Niels Bohr et ses collègues posent les bases de la mécanique quantique.
- Entre 1934 et 1938, les premières tentatives de fissions de l'uranium expliqué théoriquement par Lise Meitner font leur apparition afin de découvrir de nouveaux éléments.
- -1939, Frédéric Joliot, Hans Halban et Lew Kowarski, parviennent à mettre en évidence les produits de la fission ainsi que la formidable quantité d'énergie que celle-ci peut produire. C'est le début de la réaction en chaîne et également à partir de cette date que les premiers réacteurs nucléaires sont imaginés.

Cette date nous amène au début de la Seconde Guerre mondiale. Alors que la radioactivité n'était encore qu'au stade expérimental. Le président américain Franklin Roosevelt averti par une lettre d'Albert Einstein sur le risque du développement de bombes à partir de l'uranium par l'Allemagne Nazi fit changer la donne. L'armée américaine s'empressa de se saisir de la technologie et de développer son propre armement nucléaire, plus connu sous le nom d'opération Manhattan (Rousseau, 2015).

Au même moment les ingénieurs continuaient de développer les réacteurs afin de produire de l'électricité pour le domaine civil ainsi que le développement de réacteurs nucléaires pouvant servir à propulser des navires. Le développement de la propulsion nucléaire navale débuta en 1940 aux Etats-Unis sous supervision de l'amiral Hyman Rickover. Les premiers tests menés sur des réacteurs servant à la propulsion navale furent débutés en 1953. Seulement deux années plus tard, en 1955, l'USS Nautilus fût mis à la mer (Figure 2).



Figure 2 USS Nautilus
Source : Adapté de Wikipédia (CC BY-SA 3.0)

Cette date nous amène en pleine guerre froide entre les deux grandes puissances mondiales de l'époque, les Etats-Unis d'Amérique et l'URSS. Il s'en suit une course à l'armement et le nombre de navires à propulsion nucléaire s'envola.

C'est à l'ex-URSS que revient le record de navire à propulsion nucléaire.

Quelque 250 sous-marins, cinq navires de guerre de surface dont plusieurs lanceurs de missiles et huit brise-glaces pour un total de 900 réacteurs embarqués furent construits entre 1950 et 1990 par l'ex-URSS (Groizeleau, 2010).

Une nouvelle date importante est celle de 1957, c'est à cette date que fût mis en service pour la première fois un navire de propulsion de surface civil à propulsion nucléaire, le brise-glace Lénine. Depuis cette date, ce sont 600 navires à propulsion nucléaire qui ont été mis en service et démantelés par la suite. Aujourd'hui, ce sont environ 150 navires nucléaires qui sillonnent les mers (Garric, 2011).

2.2 Notion importante de la radioactivité

La radioactivité, qu'elle soit naturelle ou provoquée, est un phénomène physique se produisant au sein de certains atomes. Ceux-ci émettent de l'énergie sous forme de particules et/ou rayonnements ionisants. C'est cette radioactivité qui est mauvaise pour notre santé. Un atome radioactif se désintègre parfois sur de longues périodes appelées demi-vies ou période radioactive. L'uranium (^{235}U) subit jusqu'à 12 transformations avant de devenir du plomb (^{207}Pb) dans un état stable. Cette suite de réactions s'appelle chaîne de désintégration et peut durer plusieurs milliards d'années (Delacroix, Guerre & Leblanc, 2012) (Hector, 2016).

Dans le cas qui nous concerne, nous parlerons de fission d'atome, c'est à dire, la décomposition d'un noyau lourd en noyau plus léger d'un autre élément. Cette réaction produit beaucoup d'énergie thermique qui sera utilisée pour la propulsion nucléaire. Il en existe plusieurs types, alpha, bêta (+ et -) et gamma sont les plus importants. Il existe également d'autres types de radiations comme les rayons X ou le rayonnement neutronique. Chacune de ces réactions émet selon son type, une quantité d'énergie et ou particules différentes. La manière de s'en protéger ne sera donc pas la même (Delacroix, Guerre & Leblanc, 2012) (Hector, 2016).

2.2.1 La demi-vie

L'interaction faible est l'une des quatre forces fondamentales comme la gravitation, l'électromagnétisme et les interactions fortes. L'interaction faible est responsable de la désintégration radioactive des particules subatomiques. Parmi les caractéristiques les plus importantes de la radioactivité, il y a la période radioactive, notée par le symbole

(T), appelée aussi **demi-vie physique**, est une des caractéristiques qui nous intéressera pour

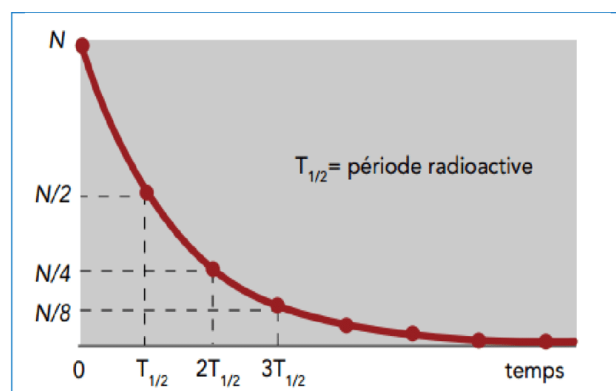


Figure 3 Evolution du nombre d'atomes radioactifs en fonction du temps
Source : Interaction rayonnement-matières (Benali, 2016)

la suite, voir Figure 3. C'est le temps nécessaire à une quantité de noyaux radioactifs pour diminuer de moitié. Ici, **N** est la quantité de substance et **T** la période.

2.2.2 Unité de mesures

Il est impossible de voir la pollution radioactive comme l'on verrait une tache de pétrole dans l'océan. Afin de savoir dans quelle quantité elle est présente dans notre environnement, il est nécessaire de pouvoir la mesurer (Figure 4). Chaque élément a des caractéristiques qui lui sont propre.



Figure 4 Compteur Geiger
Source : Adapté de Wikipédia (2008) (CC BY-SA 3.0)

La première étape pour mesurer la radioactivité est donc de mesurer celle-ci grâce au compteur

Geiger. Celui-ci donnera donc une valeur en Becquerel (par exemple 10 Bq), il se produira 10 désintégrations nucléaires par seconde.

Pour donner une image, le corps humain a une activité d'environ 8000 Bq (Genicot J-L., s.d.). Malheureusement, cette valeur ne nous apprend pas quel impact elle a sur la vie biologique, ces effets seront abordés dans la partie 2.3.

Tout d'abord, il faut parler de la **dose absorbée**. L'unité de celle-ci est le **Gray** et est exprimée en joules par kilogramme de matière. Cette unité n'est néanmoins pas assez précise pour connaître l'impact biologique car elle ne prend pas en compte le type de rayonnement, ni quels tissus ou organes ont été touchés. On parle également de débit de dose absorbée s'exprimant en Gy/h (Dc. Hector, 2016) (INRS, 2019) (Bourginon et al., 2017).

Pour connaître le réel impact des radiations sur le corps Humain, nous utilisons une autre unité appelée le **Sievert**, afin de connaître la **dose équivalente**. Chaque élément radioactif a un facteur dose, par ingestion ou inhalation qui lui est unique. Celui-ci dépend de la manière dont l'élément radioactif va s'accumuler dans le corps et avec quelle vitesse il va s'éliminer, en tenant compte également du type de rayonnement.

Le facteur dose nous permet donc de calculer la dose équivalente exprimée en Sievert de la manière suivante (Dc. Hector, 2016) (INRS, 2019) (Bourginon et al., 2017).

$$\text{Dose équivalente (Sv)} = \text{Facteur dose} * \text{dose absorbée (Gy)}$$

Il existe une 3^{ème} dose, appelée **dose efficace**, celle-ci est toujours exprimée en Sievert et prend en compte en plus des éléments précédents la « fragilité » des organes et tissus exposés à la radiation. Le facteur de pondération tissulaire nous permet de la calculer. (Dc. Hector, 2016) (INRS, 2019).

$$\text{Dose efficace (Sv)} = \text{facteur tissulaire} * \text{Dose équivalente (Sv)}$$

Grâce aux unités précédentes, une échelle des effets des radiations a été établie. La figure suivante illustre ces effets de manière générale.

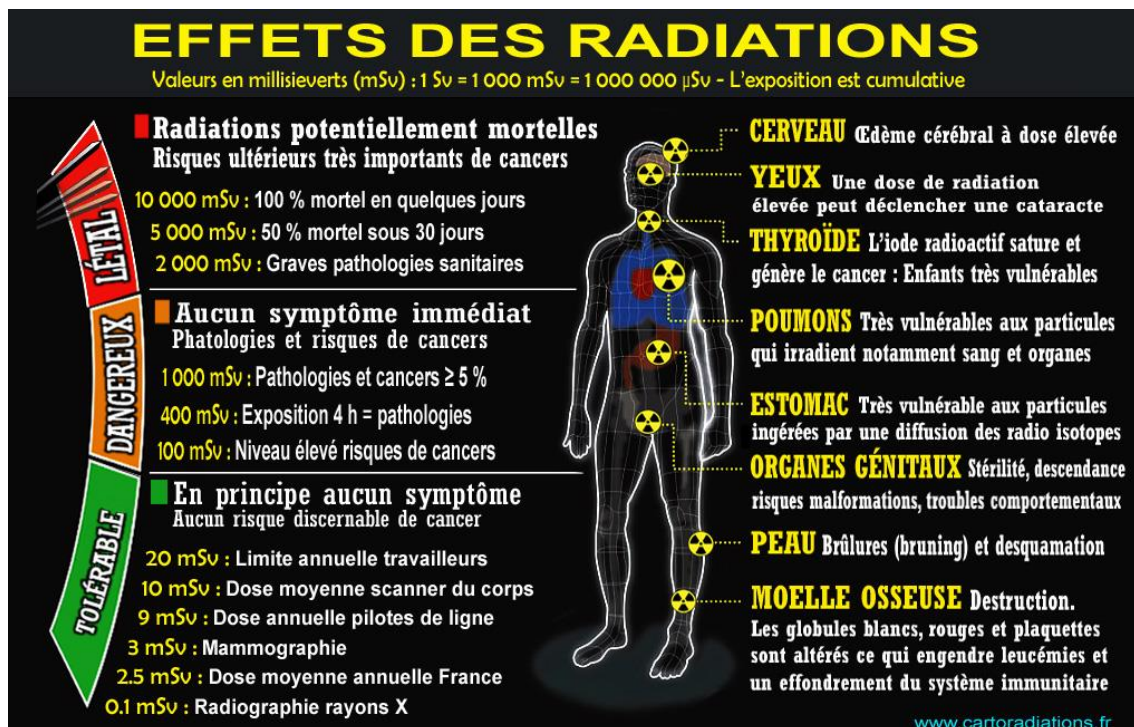


Figure 5 Effets des rayonnements ionisants
Source : Pôle Santé Travail (2016)

2.3 Influence de la radioactivité sur le corp Humain

A la différence d'une brûlure à cause du feu, les dégâts occasionnés par la radioactivité sont invisibles. Toutefois, il est possible que des brûlures apparaissent mais cela se produit très rarement lors d'une exposition très violente à la radioactivité, celle-ci a une propriété que l'on appelle mutagène, symbolisé par le pictogramme ci-contre (Figure 6).

Un agent mutagène est un élément qui a pour propriété de pouvoir changer le génome. C'est-à-dire qu'il peut forcer le changement dans le code de l'ADN des cellules d'un organisme vivant.

La radioactivité n'est pas la seule cause pouvant endommager l'ADN, mais aussi toutes sortes de produits chimiques comme ceux contenu dans le tabac ou encore les rayons ultra-violetts émis par le soleil. Il faut néanmoins savoir que l'ADN a tendance à muter naturellement.

C'est sûrement grâce à ces mutations aléatoires du patrimoine génétique que nous existons aujourd'hui.

Depuis l'apparition de la vie sur Terre, l'ADN n'a cessé d'évoluer, donnant naissance à de nouvelles espèces jusqu'à l'incroyable biodiversité que nous connaissons aujourd'hui. Ce sont les fondements de la théorie Darwinienne de l'évolution. (Tetcher, 2018) (Bourginon et al., 2017).



Figure 6 Symbole du système harmonisé de classification et d'étiquetage indiquant un produit chimique sensibilisant, mutagène, cancérigène ou reprotoxique.

Source : adapté de Wikipédia (CC BY-SA 3.0)

2.4 Les déchets

Parmi toutes les sources de radioactivité présentes sur terre, la radioactivité anthropogénique, c'est-à-dire créée par l'Homme, ne cesse de croître depuis la découverte du potentiel énergétique du nucléaire. Les déchets des réactions nucléaires ne sont pas aussi toxiques les uns que les autres. Il a fallu les classer selon différentes catégories afin de pouvoir gérer ces déchets de la bonne manière. Ils ont été classés selon leur activité radiologique (Tableau 1) et selon leur période radioactive (

Tableau 2) (AFCN, 2019).

Tableau 1 Activité Radioactive
Source : AFCN et ASN (2017)

Faible activité	<ul style="list-style-type: none"> • Débit de contact inférieur à 5 mSv/h • Mesures minimales de blindage
Activité moyenne	<ul style="list-style-type: none"> • Débit de contact entre 5 mSv/h et 2 S/h • Murs de béton et/ou verre blindé
Haute activité	<ul style="list-style-type: none"> • Débit de contact supérieur à 2 S/h • Epaisseur de blindage supérieur à la Cat.B

Tableau 2 Classement des déchets radioactifs selon leurs activités et leurs demi-vies
Source : AFCN et ASN (2017)

Catégorie A	<ul style="list-style-type: none"> • Déchets de faible ou moyenne activité • Demi-vie de maximum 30 ans • Isolé de l'environnement durant 300ans.
Catégorie B	<ul style="list-style-type: none"> • Déchets de faible ou moyenne activité • Demi-vie supérieure à 30 ans • Trop peu radioactif pour appartenir à la catégorie C
Catégorie C	<ul style="list-style-type: none"> • Déchets de haute activité à courte ou longue durée de vie • Fortement radioactif, haut rayonnement β et γ

Cette classification est valable pour les déchets nucléaires. Cependant il existe une classification spécifique concernant le transport de marchandises radioactives en mer. Il faut se diriger vers le code IMDG (International Maritime Dangerous Goods).

Celui-ci est le code à suivre pour le transport de toutes marchandises dangereuses à bord des navires de la marine marchande. Le code IMDG définit dans le vol.1 Ch.2.7, la nature des déchets radioactifs et la liste des radionucléides pouvant être transportés par la mer. On y apprend comment ont été classés les radionucléides. Ils ont été classés selon une limite de radioactivité ne pouvant pas être dépassée (IMO, 2018).

Une première distinction est faite grâce aux moyens suivant (IMO, 2018) :

- **A₁** : Matériel solide radioactif ne pouvant pas se disperser et/ou un compartiment scellé contenant du matériel radioactif (special form radioactive material).
- **A₂** : Matériaux autres que A₁.
- **LSA** : (Low Specific Activity) Matériaux à faible radioactivité. Il existe encore une sous-division en 3 catégories (LSA-I, LSA-II, LSA-III).
- **SCO** : (Surface contaminated object) Matériaux naturellement non-radioactif et qui ont été contaminés.
Divisés en 2 catégories (SCO-I, SCO-II).

Il existe également un autre élément appelé le **Transport Index**. Il est affecté sur tout colis, conteneurs, matériel contaminé ou déchet de faible radioactivité.

Il permet de connaître le niveau d'exposition aux radiations. La radiation est mesurée à une distance de 1 mètre en millisieverts par heure (mSv/h). Cette valeur est ensuite multipliée par 100. Le résultat sera le Transport Index.

Il y a d'autres facteurs de multiplication à prendre en compte pour les tanks, conteneurs, matériel contaminé et déchet faiblement radioactif non emballé, voir Tableau 4 et Tableau 8 (IMO, 2018).

Tableau 3 Facteurs de multiplication pour les tanks, conteneurs, déchets radioactifs et matériel contaminé
Source : IMDG (2018)

Taille du chargement ^a (d)	Facteur de multiplication
$d \leq 1 \text{ m}^2$	1
$1 \text{ m}^2 < d \leq 5 \text{ m}^2$	2
$5 \text{ m}^2 < d \leq 20 \text{ m}^2$	3
$20 \text{ m}^2 < d$	10

a = taille de la plus grande section transversale

Finalement grâce à la valeur obtenue, les différentes cargaisons seront classées de la manière suivante selon le transport index calculé :

Tableau 4 Catégories d'emballages, suremballages et conteneurs
Sources : IMDG (2018)

Conditions		
Transport index	Niveau de radiation maximum	Catégorie
0 ^a	Pas plus de 0.005 mSv/h	I-WHITE
Supérieur à 0 mais inférieur à 1 ^a	Supérieur à 0.005 mSv/h, mais inférieur à 0.5 mSv/h	II-YELLOW
Supérieur à 1 mais inférieur à 10	Supérieur à 0.5 mSv/h, mais inférieur à 2 mSv/h	III-YELLOW
Supérieur à 10	Supérieur à 2 mSv/h, mais inférieur à 10 mSv/h	III-YELLOW ^b

a = Si le transport index n'est pas supérieur à 0,005 mSv/h, la valeur peut être considérée comme 0

b = Doivent être transportés sous « utilisation exclusive¹ », excepté pour les conteneurs

Pour pouvoir être transporté par la mer, un colis irradié ne doit en aucun cas émettre plus de 10 mSv/h après suremballage en tout point de sa surface extérieure (IMO, 2018).

2.5 Historique d'un accident impliquant un sous-marin nucléaire.

En lien avec les déchets nucléaires venant des réacteurs, il y a également la gestion des sections irradiées des navires à propulsion nucléaire et celle des épaves ayant coulé avec du matériel nucléaire. Un accident naval impliquant un navire à propulsion nucléaire et qui a marqué les esprits, est l'accident survenu à bord du sous-marin de la marine soviétique, le *K-141 Kursk* (Figure 7). Il fut mis en service en 1994 et a sombré le 12 août 2000. Ses 118 membres d'équipage périrent dans l'accident. La théorie la plus probable serait qu'une torpille expérimental nommée « Shkval » destinée à l'exercice aurait explosé accidentellement à bord de suite d'un incendie.



Figure 7 K-141 Kursk en cale sèche après l'accident
Source : Kursk, documentaire (Lépine, 2016)

¹ *Utilisation exclusive*, pour le transport des matières radioactives, l'utilisation par un seul expéditeur d'un moyen de transport ou d'un grand conteneur, pour laquelle toutes les opérations initiales, intermédiaires et finales de chargement, d'expédition et de déchargement se font conformément aux instructions de l'expéditeur ou du destinataire, lorsque cela est prescrit par le présent Code

2.5.1 Description du navire

Le *Koursk* était un sous-marin lanceur de missiles commandé par la marine soviétique. Sa construction a débuté le 22 mars 1990 dans le chantier naval de la Sevmash, société de construction navale basée à Severodvinsk en Russie. Le 3 juin 1992, le sous-marin fut reclassé « croiseur sous-marin nucléaire ». C'est en 1993 qu'il fut renommé *K-141 Koursk* après la bataille de Koursk, dans la région du même nom. Le sous-marin fut lancé le 16 mai 1994 afin de mener de multiples essais nucléaires. Ces essais menés à bien, le sous-marin nucléaire entra en service au sein de la marine soviétique comme l'un des sous-marins les plus perfectionnés de la classe *Oscar II*.

C'est l'un des sous-marins équipés de deux réacteurs à eau pressurisée. Il est composé de deux coques fabriquées avec différents alliages métalliques afin de limiter sa signature magnétique. Il est divisé en neuf compartiments dont le dernier, un compartiment de refuge. Le Tableau 5 nous donne les spécifications générales, suivies d'un plan général (Figure 8) de la conception des sous-marins nucléaires de la classe *Oscar II* (Pike, 2000).

Il est intéressant de noter qu'il y a une différence entre le nombre d'équipage sur la fiche technique du navire (Figure 8) (107 membres) et le nombre annoncé officiellement (118 membres).

Tableau 5 Spécification générale du Koursk
Source : Travail personnel adapté de Projet 949A Antey/Oscar II (Pike, 2000)

Déplacement :	14.700 tonnes en surface 24.000 tonnes Submergée
Vitesse :	16 nœuds en surface 32 nœuds en plongée
Dimensions	154 m de longueur 18,2 m de large 9,5m de tirant d'eau 18,3 m de profondeur (mât inclus)
Propulsion	2 réacteurs nucléaires VM-5 de 190 MW à eau pressurisée 2 turbines à vapeurs de 49.000 CV marin 2 hélices à 7 pales
Autonomie	50 jours
Profondeur maximale :	600 mètres
Equipage	107 au total

Interior [notional]

No authoritative depictions of the interior of the Oscar submarine are available. This conjectural cartoon is generally representative of the probable internal disposition of major functional elements, though specific details are entirely notional.

Oscar II

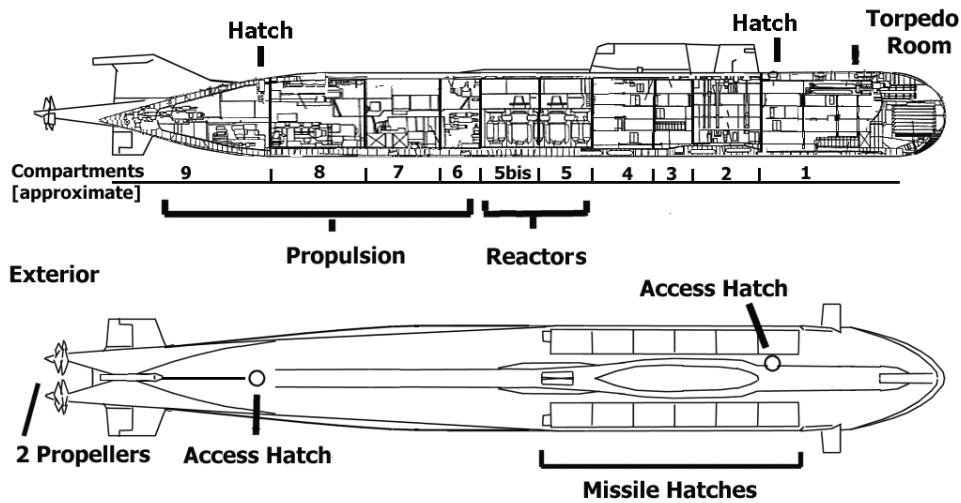


Figure 8 Schéma général de la conception des sous-marins de la classe Oscar II
Source : Projet 949A Antey/Oscar II (Pike, 2000)

2.5.2 Le naufrage

Le contexte du naufrage du Kursk est encore bardé de secret. Il se produit lors d'un exercice militaire extraordinaire organisé par la Russie, le plus important depuis la chute du régime communiste. La Russie récemment mise aux commandes de Vladimir Poutine, celui-ci s'est juré de redonner sa gloire passée à son pays et de la faire entrer au sein des grandes puissances mondiales. Nous sommes après la guerre Froide, mais les relations diplomatiques sont encore très tendues, car la Russie vend des armes aux ennemis des Etats-Unis d'Amérique. De plus lors de ces manœuvres, des responsables politiques Chinois furent invités afin de participer à des démonstrations d'armement nucléaire et d'une nouvelle catégorie de torpille nommée les « Shkval ». Celles-ci étaient redoutables car elles pouvaient atteindre une vitesse théorique de 500 km/h contre une vitesse moyenne de 60 km/h pour une torpille conventionnelle. Enfin, lors d'utilisations d'armement nucléaire, l'OTAN aurait dû être prévenu. Pour ces raisons une grande quantité de navires espions américains, britanniques et norvégiens espionnaient l'exercice à une distance raisonnable (Carré, 2004).

C'est en mer de Barents, le 20 août 2000, que l'incident débute. Une première explosion retentit à 11h28 l'avant du sous-marin dans le compartiment des torpilles, l'alerte maximale est déclenchée. C'est ici que survient déjà une première anomalie. Alors qu'une

voie d'eau est constatée, aucune remontée d'urgence par remplissage d'air des ballasts n'est enclenchée alors qu'il suffisait d'appuyer sur un seul bouton. De plus, aucune bouée de détresse ne fut envoyée par le sous-marin. Au contraire, le moteur fut mis à pleine puissance, comme si le sous-marin venait de subir une attaque extérieure. C'est 2 minutes et 15 secondes plus tard qu'une deuxième explosion à retentie à l'avant du sous-marin. Selon les écoutes acoustiques, la deuxième explosion aurait été 100 fois supérieure à la première. C'est ainsi que le Kursk coula par 108 mètres de profondeur. Les marins arrêtaient les deux réacteurs nucléaires et allèrent se réfugier dans le dernier compartiment, le compartiment de survie, le n°9, lequel est équipé d'un sas de secours (Carré, 2004).

Le sous-marin a coulé à une profondeur relativement faible pour sa taille. Il aurait même été possible de le voir depuis la surface. Pour illustrer ce propos, si le Kursk pouvait être remonté à la verticale, la poupe dépasserait de la surface d'une hauteur de 50 mètres. De plus, dans cette position, la sortie d'évacuation du dernier compartiment aurait été hors de l'eau (Figure 9). Tout aussi étonnant et faisant un peu plus encore penser à une attaque ennemie est que l'Amiral en chef Popov a ordonné à son navire de s'éloigner du Kursk, avant de retourner en urgence sur sa base à Terre quelques heures plus tard. Au même moment, un petit sous-marin et plusieurs scaphandriers sont descendu sur la zone du naufrage pour inspecter le sous-marin. Ils entendirent même des S.O.S, martelés par des marins encore en vie dans le sous-marin. Etrangement, aucune équipe de scaphandriers n'interviendra durant le sauvetage. Toutes ces questions soulevées par la presse furent classées secret défense.



Figure 9 Image représentant le Kursk en position verticale

Source : Kursk, un sous-marin en eaux troubles (Carré, 2004)

Beaucoup d'autres mystères occultent la véritable histoire du Kursk. Les autorités ont fait plusieurs communiqués mensongers afin de masquer la vérité, comme avoir dit d'avoir mis plus de 30 heures à trouver le Kursk, que c'était un incident mineur, qu'aucun armement nucléaire se trouvait à bord. Toutefois, plusieurs membres de l'armée démentiront ces précédents communiqués seulement des années plus tard.

Dans un reportage sur la tragédie du Kursk mené par Jean-Michel Carré en 2004, Maurice Standling, ingénieur en torpille et consultant au ministère de la défense Britannique disait « Aucun navire de guerre ne part en mission sans son armement habituel, même s'il s'agit d'un exercice. Même si nous sommes engagés dans un exercice, nous pouvons être appelés à tout moment dans un conflit réel » (Stangling, 2004). Le gouvernement Russe, empêtré dans ses mensonges, refusa pendant plusieurs jours l'aide des Occidentaux avant d'accepter leur aide au bout d'une semaine et de débiter une opération de sauvetage. L'opération de renflouage du Kursk fût longue et couteuse et sera expliquée en plus de détails au point 5.4.3, afin d'illustrer la manière dont sont gérées les opérations de démantèlement des navires à propulsion nucléaire.

Chapitre 3 : Question de recherche – Est-il possible de remplacer le fuel lourd par des matières fissiles ?

Nous avons abordé pour le moment la problématique de la propulsion conventionnelle, des émissions toxiques liées à son utilisation, les risques sanitaires qui en résultent ainsi que la projection de l'augmentation de son utilisation jusqu'en 2035. Nous avons entrevu une solution dans la propulsion nucléaire quant à la réduction des émissions toxiques ainsi que dans l'objectif de décarbonisation. Néanmoins, cette technologie n'est pas sans risque et produit d'autres formes de déchets dont certains peuvent être présent pour des millions d'années. La tragédie du Kursk illustre qu'un risque de pollution radioactive massive est possible.

Nous allons mesurer la capacité de l'énergie nucléaire à apporter une solution dans la crise écologique que nous connaissons aujourd'hui sachant que cette énergie est connue pour ne pas émettre de gaz à effets serre à l'utilisation. Cela afin de répondre à la question posée dans le titre :

Est-il possible de remplacer la propulsion conventionnelle par la propulsion nucléaire de façon durable ? C'est-à-dire, est-il plus ou moins polluant pour l'environnement d'utiliser la propulsion nucléaire que la propulsion conventionnelle.

Ce sujet sera abordé en trois parties. Premièrement, une description du fonctionnement de chaque type de propulsion, avec leurs avantages et inconvénients. Cette partie devrait permettre de comprendre l'enjeu économique lié à l'utilisation de carburant nucléaire ou de matière fissile. Ensuite, une étude de l'impact écologique des deux types de propulsion. Afin de détailler clairement et de comprendre les effets néfastes majeurs de chaque type de propulsion. Finalement, une analyse de durabilité. Le terme durabilité est utilisé pour désigner un élément/configuration de la société humaine qui lui permet d'assurer sa pérennité. Une telle organisation humaine repose sur le maintien d'un environnement viable, permettant le développement de l'espèce Humaine. Dans notre cas, nous analyserons la durabilité de ces deux types de propulsion.

Chapitre 4 : Propulsion et économie

Le choix du mode de propulsion pour un navire est généralement opéré lors de la construction de celui-ci. Ce choix sera effectué en fonction des avantages économiques de chaque mode de propulsion. Dans ce chapitre, nous essayerons de comprendre et d'analyser les avantages et inconvénients liés à chaque mode de propulsion comme l'autonomie, la capacité de cargaison, différence structurelle afin de comprendre pourquoi peu de navires sont aujourd'hui propulsés par l'énergie nucléaire.

4.1 Pourquoi les navires utilisent t'ils la propulsion nucléaire ?

Le climat change, c'est l'une des plus grandes préoccupations de notre époque, et le sera pour les années à venir. Un intervenant majeur dans le changement climatique est l'effet de serre provoqué par certain gaz émis par les activités humaines, le plus connu est le dioxyde de carbone (CO₂). (Candaes, 2001) (Landrieux, 2014) (Tissot, 2003). La quantité totale de dioxyde de carbone produite par l'Homme en 2019 aurait été de 43,1 milliards de tonnes. La marine marchande est un acteur significatif de cette production, à hauteur de de 2,7% comme nous le montre la Figure 10, ce qui correspond à une quantité de 1,16 milliards de tonne. Il est impératif de trouver des solutions alternatives aux fiouls conventionnels.

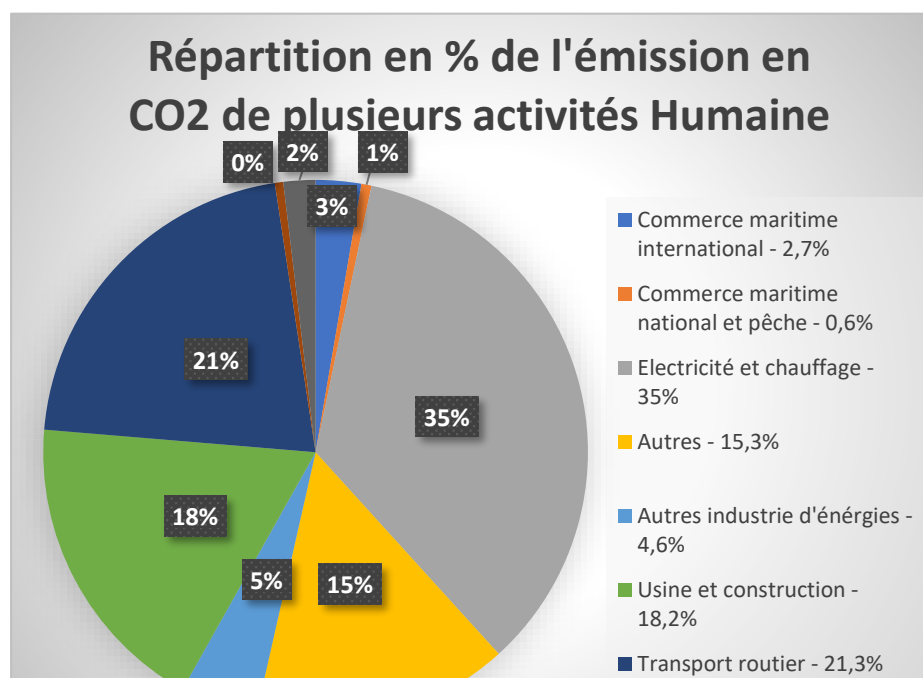


Figure 10 Graphique représentant le % d'émission de CO₂ de plusieurs activités Humaine
Source : Travail personnel adapté d'après les chiffres de climat.be (2017)

La chaleur émise par le soleil sous forme de rayons infrarouges est absorbée par la terre et réémise vers l'espace. Seulement, certains gaz empêchent les rayons infrarouges de quitter la Terre, infligeant à celle-ci un réchauffement connu sous le nom d'effet de serre. Ce phénomène sera abordé avec plus de détails au chapitre 5. Il est néanmoins possible à ce jour de produire, transporter et stocker de l'énergie grâce aux différents systèmes alternatifs à ceux produisant des gaz à effet de serre à l'utilisation (Candaes, 2001) (Landrieux, 2014) (Tissot, 2003). :

- L'énergie éolienne
- Batterie
- Biocarburant
- L'énergie nucléaire

- L'énergie solaire
- Cellule d'énergie
- LNG/LPG

Toutes les personnes intéressées par le développement technologique ne peuvent nier l'avancée spectaculaire fournie par l'énergie nucléaire. Depuis le voyage inaugural du *Nautilus* sous les glaces du pôle Nord, la propulsion nucléaire a permis la conception d'un tout nouveau genre de navire, aussi bien des sous-marins que des navires de surface (Carlton, 2011) (Murray, 2009).



Figure 11 Navire brise-glace Lénin
Source : Adapté de Wikipédia (CC BY-SA 3.0)

Cette incroyable énergie a très vite intéressé la marine marchande car en plus d'augmenter la portée des navires, elle a permis également de diminuer la consommation de carburant, surtout à haute vitesse. Un autre avantage économique, théorique néanmoins, c'est l'économie faite sur le volume de carburant nécessaire au navire (Tableau 6). Ceci résultat dans la conception des premiers navires marchands à propulsion nucléaire le *NS Savannah* pour les Etats unis et le *Lénin* pour l'ex-URSS (Figure 11).

En résumé, il y a 3 grands avantages économiques à l'utilisation d'un navire à propulsion nucléaire (Halvor, 2017) :

- L'élimination du volume et du poids requis pour le carburant, ce qui résulte en une capacité de cargaison augmentée.
- Une extension de leur portée, ce qui fait des navires nucléaires, des navires « indépendant » au niveau du soutage de carburant en dehors de leur port d'origine.
- Opérer le navire à propulsion nucléaire à haute vitesse, ce qui n'est économiquement pas viable pour un navire à propulsion conventionnelle.

4.2 Conception d'un navire à propulsion nucléaire par rapport à un navire conventionnel

Comme vu précédemment, il existe des avantages et inconvénients à chaque mode de propulsion. Il est nécessaire de faire un bref récapitulatif des différences majeures de conception entre ces deux modes de propulsion avant de discuter des carburants.

Le choix du mode de propulsion est le premier facteur entrant en compte lors de la construction du navire, il est certain au vu de la technologie complexe, que la conception d'un navire nucléaire est plus chère. Le graphique ci-dessous, tiré d'un rapport sur la faisabilité de la propulsion nucléaire, nous indique que dépendant des modèles testés. La valeur nette des coûts du cycle de vie d'un navire à propulsion nucléaire reste plus faible.

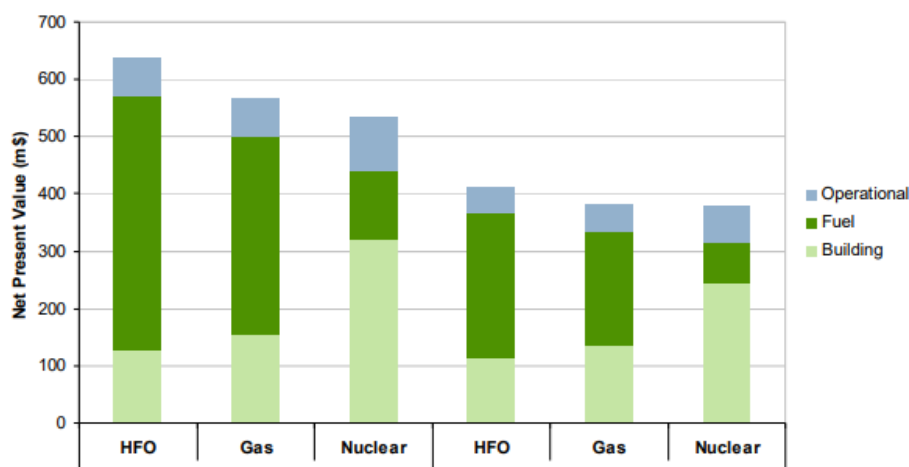


Figure 12 Variation de la valeur nette des coûts des cycles de vie entre différents modes de propulsion.

Source: Nuclear powered ships – findings from a feasibility study (Shunichiro et al., 2011)

Un navire à propulsion nucléaire peut ressembler de l'extérieur à un navire conventionnel, mais ils sont fondamentalement différents à l'intérieur. Un moteur nucléaire diffère d'un moteur à combustion, simplement déjà par le remplacement des pistons de combustion par un réacteur nucléaire. C'est dans celui-ci qu'est générée une grande quantité d'énergie sous forme de chaleur. Celle-ci sera utilisée pour créer de la vapeur qui pourra être utilisée par une turbine à vapeur conventionnelle ou encore à chauffer des gaz pour une turbine à gaz. Il existe néanmoins une différence majeure entre les deux types de propulsion, ce sont les grandes quantités de radiations émises par le réacteur nucléaire (IRSN, 2017) (Halvor, 2016).

Avant de pouvoir initier un réacteur nucléaire, celui-ci doit être pourvu de blindages conséquents afin de pouvoir contenir les radiations au sein même du réacteur. Une autre différence majeure entre les deux types de propulsion, c'est la quantité de fuel stocké au sein même du moteur. Dans le cas d'un moteur à propulsion conventionnelle, une quantité limitée de fuel se situe dans le moteur au moment du cycle de combustion. S'il se produit un problème lors de l'apport en fuel au moteur, celui-ci tournera au ralenti ou s'arrêtera. C'est fondamentalement différent pour un moteur nucléaire, la quantité totale de combustible nucléaire nécessaire pour plusieurs mois, même parfois plusieurs années est située au sein même du cœur du réacteur (Carlton et al, 2011).

Il est donc impératif d'avoir un système de mesures et contrôle de la réaction nucléaire afin de pouvoir opérer le réacteur en toute sécurité. Le niveau d'énergie de ce type de moteur peut grimper en quelques secondes d'une valeur faible à plusieurs millions de kilowatts. Pour ces différentes raisons, les navires à propulsion nucléaire sont beaucoup plus chers à construire qu'un navire à propulsion conventionnelle (IRSN, 2017) (Halvor, 2016).

4.2.1 Moteur à propulsion conventionnel

Un navire à propulsion conventionnelle utilise des substances dérivées du pétrole brut afin de fournir l'énergie au moteur. Il existe différents types de moteur : 2-temps, 4-temps, turbine à gaz, etc. La Figure 13 représente schématiquement la conception d'un moteur à 2-temps marin utilisant du fioul lourd comme carburant.

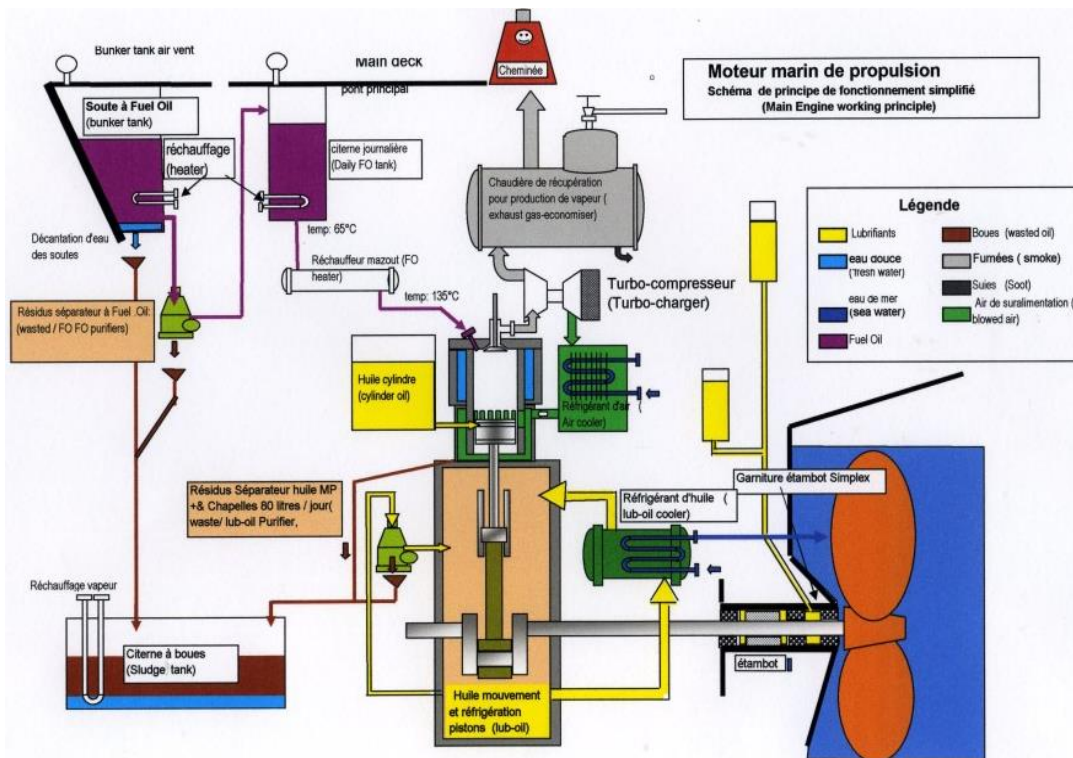


Figure 13 Schéma d'un moteur à propulsion conventionnel
Source : Gestion des déchets huileux à bord des navires – AFCAN (2006)

4.2.2 Moteur à propulsion nucléaire

Les navires à propulsion nucléaire utilisent un ou plusieurs réacteurs nucléaires afin de produire de l'énergie généralement avec une puissance entre 10 à 300 MW. Entre 900 et 1300 MW pour une centrale civile.

Il existe cinq grands types de réacteur nucléaire (IRSN, 2017) :

- Réacteur à eau pressurisée (REP)
- Réacteur à eau bouillante (REB)
- Réacteur à eau lourde
- Réacteur à neutrons rapide (RNR)
- Réacteur caloporteur à gaz (RCG)

Les navires à propulsion nucléaire étant majoritairement équipés de réacteurs à eau pressurisée, c'est ce dernier qui sera traité dans notre cas. La Figure 14 représente basiquement la conception d'un réacteur à eau pressurisée. D'après des articles consultés, ce type de réacteur possède divers avantages expliquant son utilisation pour la propulsion navale (Sherman, 2000) (Carlton, 2011) :

- Il a une plus grande quantité de puissance dans un petit volume.
- Il peut fonctionner avec de l'uranium faiblement enrichi, mais cela signifie un réapprovisionnement en matière fissile plus régulière.
- Les taux moyens d'enrichissement de l'uranium peuvent aller de 20% à 96% en uranium-235. Plus le taux d'enrichissement sera important, plus le temps entre le réapprovisionnement sera long.
- Le matériel utilisé, UO₂ (dioxyde d'uranium) est proche de celui utilisé dans les centrales civiles.
- Ce type de réacteur permet d'avoir un caisson étanche et compact afin d'assurer à tout moment la sûreté nucléaire.
- L'utilisation de l'énergie nucléaire permet de diversifier nos sources d'énergie et d'ainsi diminuer notre dépendance aux fiouls fossile.

L'eau sous pression reste à l'état liquide. Elle est à la fois le caloporteur et le modérateur.

- Caloporteur : Fluide chargé du transport d'énergie dans le système.
- Modérateur : Substance qui ralentit les neutrons sans les absorber, permet une réaction nucléaire en chaîne efficace et modérée.

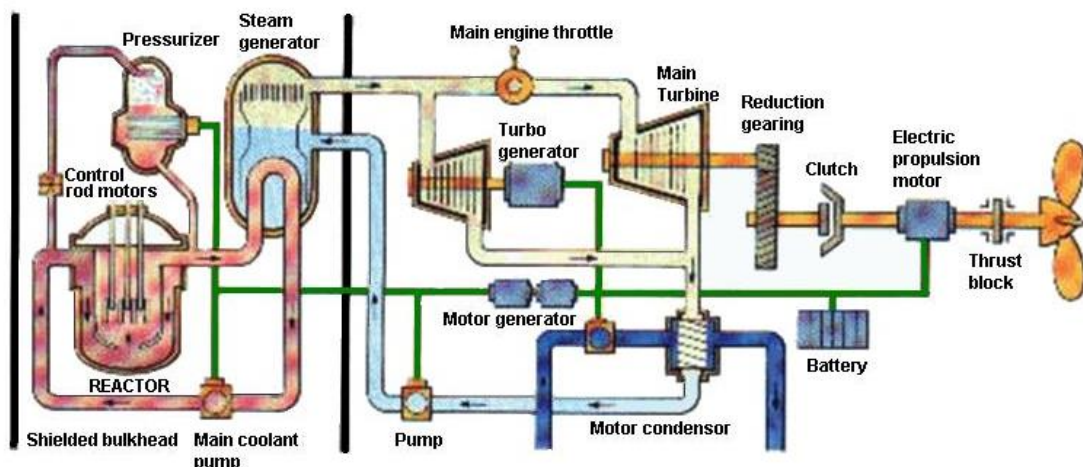


Figure 14 Schéma d'un moteur nucléaire à eau pressurisé
Source : Nuclear Propulsion (Sherman, 2000)

Dans le cas des réacteurs à eau pressurisée, ce sont les atomes d'hydrogène qui composent les molécules d'eau, dont la masse du noyau est proche de celle des neutrons qui permettent une bonne modération de la réaction. Cette réaction nucléaire requiert donc de l'uranium enrichi afin d'être efficace (Sherman, 2000) (Carlton et al, 2011).

- 1) La réaction nucléaire se produit dans le cœur du réacteur. La chaleur produite par celle-ci est transférée au générateur de vapeur grâce au circuit d'eau pressurisé, appelé aussi circuit primaire.
- 2) Cette chaleur permet de créer de la vapeur pour alimenter la turbine à vapeur principale afin de mettre l'hélice en rotation par l'intermédiaire de différents engrenages et boîtes de vitesses. Une autre turbine peut être utilisée afin d'alimenter un générateur électrique et ainsi recharger des batteries ou encore permettre la propulsion au moyen d'un moteur électrique.
- 3) La vapeur est ensuite refroidie au moyen d'un système de refroidissement généralement à l'eau de mer. La vapeur condensée retourne enfin au réacteur pour recommencer le cycle.

Pour illustrer l'économie d'espace de cargaison mentionnée au point 4.1, les données suivantes sont extraites d'un document concernant l'ingénierie maritime. Elle compare la conception d'un navire à propulsion conventionnelle face à la technologie nucléaire SMR (Small Modular Reactor). Cette technologie possède plusieurs avantages parmi les plus importants (Hiradris, 2014) (Carlton et al,2011) :

- La taille et la puissance sont plus modeste, de 10 à 300 MW au maximum.
- Construction modulaire, permettant une conception accélérée.
- Volume réduit signifie un confinement du réacteur facilité.
- Permet une indépendance des énergies fossiles.
- Permettre la préparation de la transition énergétique

Le Tableau 6, nous apporte plus de détails techniques quant à la conception des deux navires et à sa répartition des masses à bord. Deux informations y sont importantes. Premièrement, le déplacement à vide est plus important pour la technologie nucléaire avec une différence de 6342 tonnes supplémentaire.

Deuxièmement le gain de capacité liée à l'économie du fioul et de son espace de stockage est de 3588 tonnes. Même si un navire nucléaire lège a un déplacement plus important qu'un navire à propulsion conventionnelle, il a de l'espace de cargaison accrue (Hiradris, 2014).

Un petit calcul rapide à faire pour le pétrole brut :

3588 tonnes nous donnent 4221,17m³ si nous tenons compte de la densité moyenne du pétrole brut en mer du Nord (API 35 = 0,850).

Un baril de pétrole s'échange à 40,44\$ le 02/08/2020 et équivaut à environ 159 litres.

Ceci nous fait la somme de 1.073.612 \$.

Tableau 6 Comparaison des masses à bord d'un navire à propulsion conventionnel et un navire de type SMR
Source: Considerations on the potential use of Nuclear Small Modular Reactor (SMR) technology for merchant marine propulsion – Ocean engineering 79 (2014)

LIGHTSHIP			
	Mass (t)	LCG (m)	VCG (m)
Weights ON			
2 x SMR (Small Modular Reactor)	100.00	48.400	9.550
Steam Generation Unit	150.00	41.900	11.550
Propulsion Reduction Gear and Steam Turbines	260.00	30.919	5.270
Azipod and Associated Switchgear	270.71	-1.517	9.750
Azipod Drive	11.00	-1.517	9.750
Auxiliary Turbines	94.26	27.511	15.700
Redundant Power Source Generators	56.00	0.639	19.193
Emergency Cooling Water	423.20	54.006	13.051
Lengthening of vessel	2291.84	142.700	12.886
Lengthening of vessel (Increased scantlings)	45.84	142.700	12.886
SMR Structural Protection	3374.3	48.400	11.550
Intermediate Shaft	29.41	19.264	4.563
Weights OFF			
Main Engine Hyundai – B&W	-555.00	25.200	14.575
Steering Gear	-20.74	1.600	20.000
D/G Engine	-42.90	16.000	14.575
Generator	-15.00	16.000	14.575
Aux. Boiler	-94.00	16.600	20.000
Exh. Gas Economizer	-22.10	19.700	20.000
Atmospheric Condenser	-1.53	24.000	11.550
C.O.P.T. Condenser	-13.05	24.000	11.550
M/E Jacket F.W Preheater	-0.29	24.000	11.550
Total ΔLightship	6342	82.280	11.145
DEADWEIGHT			
	Mass (t)	LCG (m)	VCG (m)
Weights ON			
Fuel Capacity for Redundant Power Source	274.27	11.269	17.314
Weights OFF			
Bunker Fuel and Tanks	-3862.30	35.798	16.980
Total ΔDeadweight	-3588	37.673	16.952

4.3 Carburant marin et matière fissile

Afin de produire de l'énergie, que le navire soit conventionnel ou à propulsion nucléaire, ils ont tous deux besoins d'une substance pouvant libérer de l'énergie.

Le carburant marin pour les navires conventionnels et la matière fissile pour les navires à propulsion nucléaire. Dans cette partie nous allons aborder les différences entre les deux types de substances. La manière dont elles sont produites et la façon dont elles sont utilisées pour la propulsion.

4.3.1 Carburant marin conventionnel

Le carburant marin est un terme générique pour parler des différents carburants pouvant servir à la combustion d'un moteur de propulsion marine. Il en existe différents types, ceux qui sont majoritairement utilisés sont le fioul lourd (HFO), le diesel marin (MDO) et le gasoil marin (MGO). Il existe également des navires utilisant le gaz naturel (LNG) et gaz de pétrole (LPG) (Thuy,2019).

L'OMI, dans un rapport de 2018, annonçait que le transport maritime consomme à lui seul 250 à 300 millions de tonnes de carburant marin liquide. Ces carburants sont de longues chaînes d'hydrocarbures, généralement des fractions lourdes de la distillation du pétrole brute. Ces produits ont un aspect généralement visqueux et contiennent généralement une quantité remarquable de soufre (SO_x). De plus, le rapport annonçait également que la marine marchande participe à hauteur de 2,7% des émissions mondiales de gaz à effet de serre pour une quantité totale émise en un an de 940 millions de tonnes de CO_2 (OMI, 2018).

La Figure 15 ci-dessous représente comment est physiquement séparer le carburant marin durant la distillation du pétrole brut.

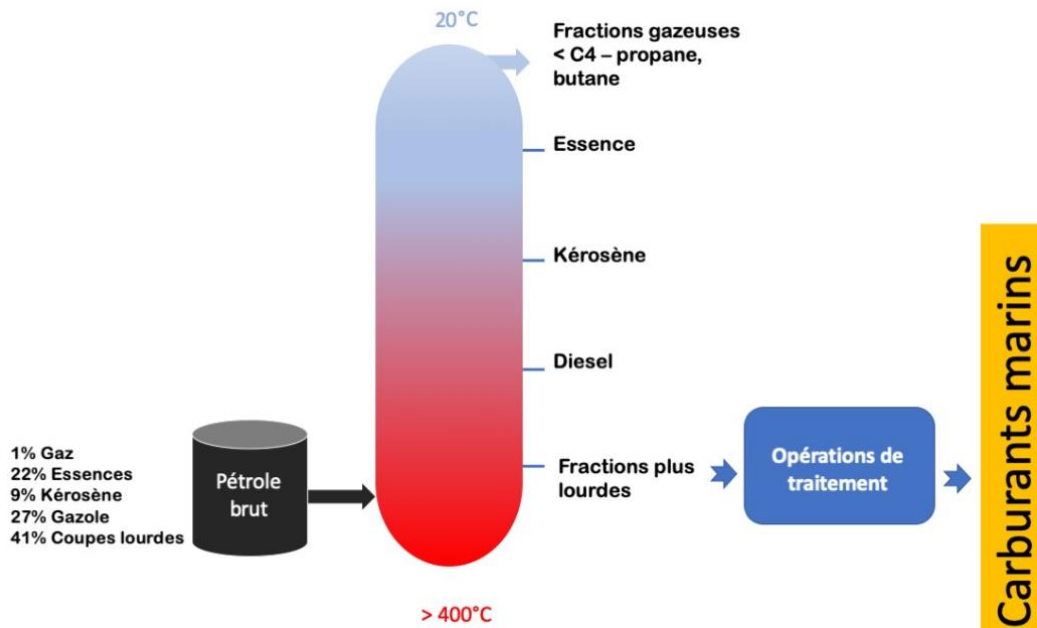


Figure 15 Représentation simplifiée de la distillation du pétrole brut
Source : Richel (2019)

Qu'il soit sous forme gazeuse, liquide ou solide, la composition du carburant peut être représentée sous la forme générique suivante :



Cela que signifie que peu importe l'état de la matière combustible, elle présente toujours une forme de combinaison d'un atome carbone (C). On trouve en moyenne « y » hydrogène (H) et « x » atomes d'oxygène (O). Pour illustrer cela, le tableau suivant indique cette proportion.

Type de combustible	Composition générique
Biomasse	$C H_{1,44} O_{0,66}$
Charbon (tourbe)	$C H_{1,2} O_{0,5}$
Charbon (anthracite)	$C H_{0,4} O_{0,22}$
Pétrole	$C H_{1,8}$
Gaz	$C H_{3,75} \rightarrow C H_{3,95}$

En réalité, le fuel contient également des traces de soufre. Le tableau ci-dessous est tiré d'un rapport de la société Global Combustion System et nous renseigne un peu plus sur la composition du fioul marin.

Tableau 7 Composition des différents fuel marin liquide
Source : Oil fuel properties – GCS (2020)

Property	Units	Diesel Oil (Gas Oil)	Light Fuel Oil (LFO)	Medium Fuel Oil (MFO)	Heavy Fuel Oil (HFO)
Composition:					
Carbon	%C	85.7	85.5	85.3	85.1
Hydrogen	%H	13.4	11.5	11.2	10.9
Sulphur	%S	0.9	3	3.5	4

Ce tableau illustre le fait que dépendant la fraction de la distillation (Figure 15) utilisée, le taux de soufre contenu dans le fioul sera très différent. Il apparaît donc clair que l'utilisation de fioul lourd (HFO) aura comme conséquence une émission plus importante de SO_x que le diesel (Diesel Oil – MDO). La combustion 1kg de fuel requiert en moyenne 13 à 14 kilogrammes d'air. Nous savons que l'air est composé de la façon suivante (Briblecombe, 1996) :

- 78,08 % d'azote – N₂
- 20,95 % d'oxygène – O₂
- Moins de 1% de gaz rare (Argon, Xénon, etc.).
- Également de la vapeur d'eau, du dioxyde de carbone – CO₂, méthane – CH₄, situé dans la couche basse de l'atmosphère.

C'est l'oxygène qui est nécessaire à la combustion du fioul comme l'indique la réaction de combustion du méthane suivante :



En plus du dioxyde de carbone (CO₂) et de la vapeur d'eau (H₂O), l'azote entrant dans la composition de l'air, ne reste pas inchangé lors de la combustion. Celui-ci se transforme en oxyde d'azote (NO_x). Il est comme l'oxyde de soufre (SO_x) et le dioxyde de carbone (CO₂), nuisible pour l'environnement. Le chapitre 5 sera concerné à la problématique des émissions liées à l'utilisation de fiouls conventionnels.

4.3.2 Matière fissile

Le combustible nucléaire est comme l'essence d'une voiture, sans ce dernier, aucune réaction nucléaire n'est possible. Le combustible est composé de matière fissile.

Ces produits, comme l'uranium ou le plutonium, dont le noyau atomique est relativement gros (nombre de protons et neutrons) peuvent être scindé et transformé en noyau plus petit. Nous parlons de combustible et combustion mais ce sont en réalité des termes inappropriés dans le cadre de réaction nucléaire car à aucun moment une combustion se produit.

Combustible : Composé chimique qui, avec un ~~comburant~~ et de l'énergie, se consume dans une ~~réaction chimique~~ générant de la chaleur.

Combustion : C'est une réaction exothermique d'oxydoréduction.

Les termes exacts sont réaction nucléaire (combustion) et matière fissile (combustible). Un élément chimique est dit fissile si son noyau peut subir une fission nucléaire sous l'effet d'un bombardement de neutron. C'est sous l'effet de ce bombardement qu'un élément lourd peut être scindé en noyaux plus légers et libérer de l'énergie. La matière fissile la plus fréquemment utilisée est l'UO₂ (dioxyde d'uranium) qui subit lors d'une réaction nucléaire une chaîne de désintégration en 13 étapes (Figure 16) avant d'arriver à un élément stable, le plomb.

Il n'existe qu'un seul élément fissile à l'état naturel, c'est l'uranium 235.

Malheureusement cet isotope de l'uranium est rare, son abondance naturelle n'est que de 0,72% contrairement à l'uranium 238 qui est de 99,27%. Cette faible quantité s'explique par la différence de demi-vie ainsi que par la quantité estimée présente à la formation de la Terre (1 et 4,5 milliards d'années) (Acton, 2007) (Carlton et al, 2011).

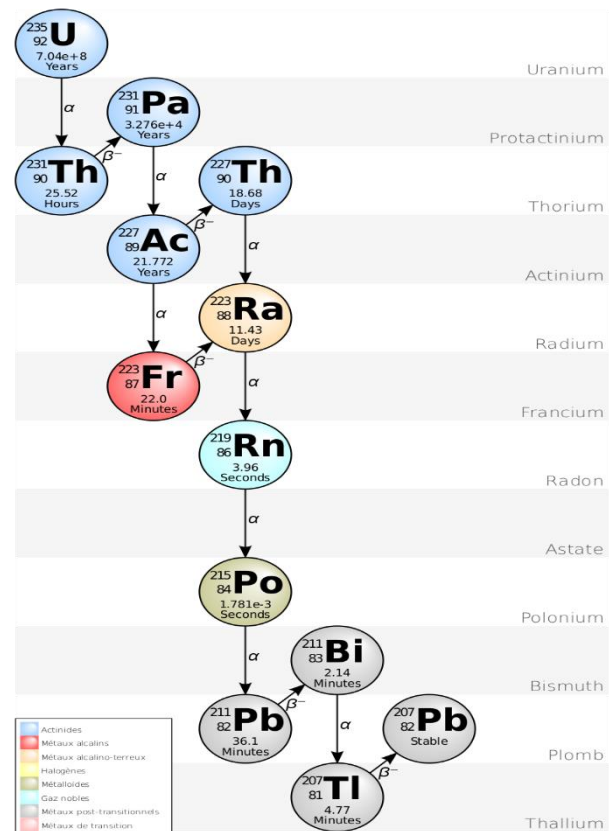


Figure 16 Chaîne de désintégration de l'uranium 235
Source : Adapté de Wikipédia (CC BY-SA 3.0)

Comme il existe différents types de carburants pour les moteurs à combustion (HFO, MGO, DGO, LPG, LNG), il existe différentes matières fissiles, mais celles-ci doivent être produites artificiellement (Carlton et al, 2011) (de Mestral, 2013) (Lung & Otto, 1998).

- Plutonium : Rare dans la croûte terrestre, présent en plus grande quantité dans l'atmosphère due aux essais nucléaires entre 1950 et 1960. Généralement récupéré durant le processus de reconditionnement de la matière fissile.
- Thorium : Matière non fissile à l'état naturel (thorium-232) mais légèrement radioactive. Celle-ci peut toutefois être utilisée dans les réacteurs nucléaires car elle absorbe lentement les neutrons pour former en fin de chaîne, l'uranium-233. Par formation de l'uranium-233, du thorium-233 est aussi produit qui lui est une matière fissile. Le thorium mérite toutefois notre attention pour diverses raisons :
Son abondance naturelle est quatre fois supérieure celle de l'uranium. La quantité connue aujourd'hui est suffisante pour 10.000 ans. Un kilogramme de thorium produit autant d'énergie que 200 kg d'uranium. La production des déchets est moindre, pas de déchets à longue vie, 83% des déchets ne sont plus radioactifs en 10 ans, les 17% restant en 300 ans, durée conséquente mais quand même environ 1000 fois plus court. Contrairement aux réacteurs à eau pressurisée (REP), un réacteur au thorium travaille à pression atmosphérique contre 160 ATM pour une REP, cela signifie, pas d'expulsion de déchets nucléaires en cas d'explosion.
Pas d'emballement de la réaction possible due au fait que plus la chaleur monte moins la réaction nucléaire se produit, c'est le contraire dans les centrales actuelles d'où la nécessité de modérer la réaction. Avantage et inconvénient à la fois, le réacteur doit fonctionner en parallèle avec un accélérateur de particules afin de pouvoir créer la réaction, toutefois si l'accélérateur pour une raison ou un autre est arrêté, la réaction nucléaire s'arrête également. Les déchets à longue vie actuels peuvent servir à alimenter le réacteur, ce qui solutionnerait la problématique des déchets à longue durée de vie. Si cette technologie possède autant d'avantages pourquoi n'a-t-elle pas été développée ? Contexte de la guerre froide, les armes nucléaires requièrent du plutonium produit comme déchet nucléaire des centrales classiques. A l'époque un défaut, aujourd'hui une qualité (de Mestral, 2013).

- MOX fuel : C'est une matière fissile totalement artificielle issue du retraitement nucléaire. Généralement composé d'un mélange d'uranium et plutonium.

Il serait compliqué d'énoncer tous les processus de production d'énergie pouvant découler de ces différentes matières fissiles, ce pour quoi l'accent sera mis sur la matière fissile le plus fréquemment utilisé dans un moteur nucléaire naval, l'uranium-235.

Etant donné que l'abondance naturelle de l'uranium-235 est faible, il faut enrichir le matériel fissile de manière à pouvoir l'utiliser un réacteur nucléaire. Le procédé consiste à augmenter la quantité d'uranium fissible dans le matériel qui sera utilisé pour la fission nucléaire dans le réacteur. Ceci est obtenu grâce à des centrifugeuses à gaz. L'uranium est vaporisé et centrifugé sous forme de gaz dans de grandes colonnes. L'uranium-238 étant plus lourd, celui-ci est écarté par la force centrifuge tandis que l'uranium-235 reste au centre. Ce procédé est répété en cascade afin d'arriver au taux d'enrichissement désiré. La Figure 17 et la Figure 18, représentent le procédé d'enrichissement de l'uranium de façon schématique.

Le fonctionnement des centrifugeuses

Gaz hexafluoride d'uranium placé dans un cylindre en rotation à grande vitesse

Gaz légèrement appauvri récupéré et réutilisé pour l'étape précédente

Gaz légèrement enrichi récupéré et utilisé pour l'étape suivante

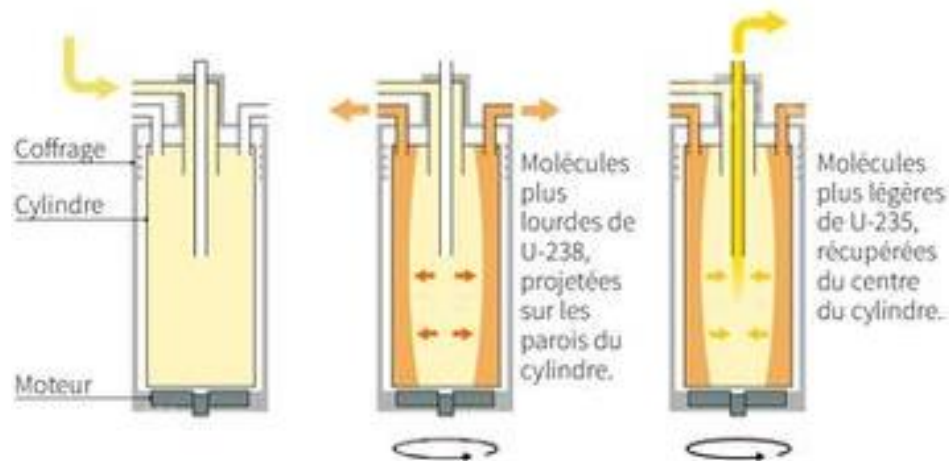


Figure 17 Fonctionnement des centrifugeuses à gaz
Source : Agence International de l'énergie Atomique (AIEA) (2018, Mai)

Cascades

Des centaines voire des milliers de centrifugeuses sont couplées pour répéter le procédé en cascade, jusqu'à l'obtention d'un gaz hautement enrichi en U-235.

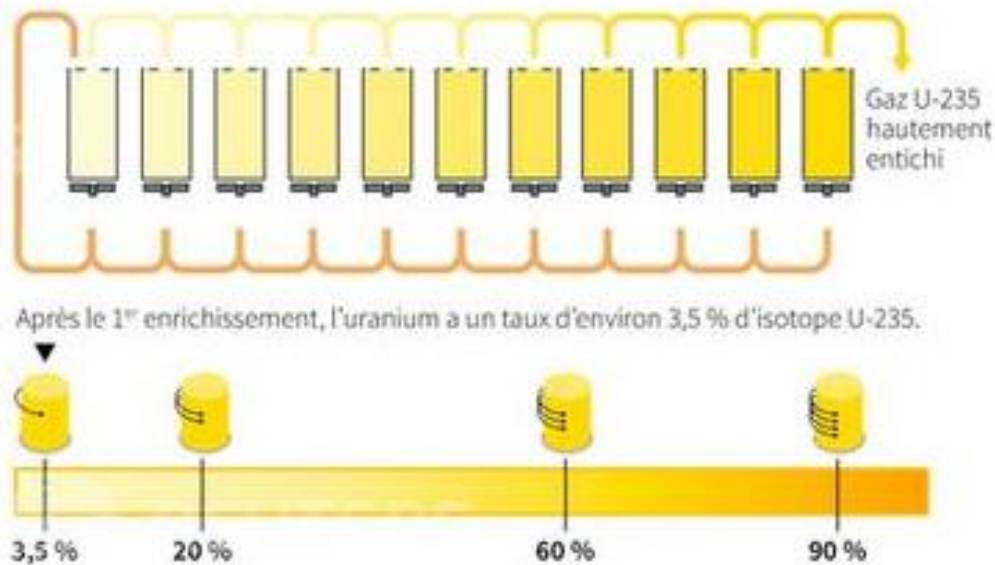


Figure 18 Procédé d'enrichissement en cascade
Source : Agence International de l'énergie Atomique (AIEA) (2018, Mai)

Les taux d'enrichissement de l'uranium lors de la guerre froide, pour la matière fissile utilisée pour la propulsion nucléaire sont variables et pouvaient aller de 21 à 45% pour les sous-marins soviétiques jusqu'à plus de 96% dans les sous-marins américains afin d'avoir accès à la puissance maximale rapidement. Aujourd'hui, le taux d'enrichissement moyen en uranium-235 est de 15%. Pour donner un point de comparaison quant à la capacité énergétique de l'uranium, un gramme d'uranium-235 produit autant d'énergie que 1,850 tonnes de pétrole (Moltz, 2006).

En ce qui concerne la propulsion nucléaire civile, la résolution A.491 (XII) de développé par l'OMI datant de 1981, est un code de sécurité pour les navires à propulsion nucléaire. C'est une guide pour les administrations (société de classification, contrôle portuaire, Etat pavillon) sur les standards accepté de construction, opération, maintenance, inspection, sauvetage et démantèlement des navires à propulsion nucléaire.

4.4 Autonomie

Comme cité précédemment la propulsion nucléaire permet une autonomie et un rayon d'action accru. Ceci dépendant également de l'enrichissement du matériel fissile. Le Tableau 8 ci-dessous, établi pour des sous-marins, rend compte de la capacité accrue de la propulsion nucléaire avec une différence de vitesse de croisière notable

Tableau 8 Comparaison des performances de différents mode de propulsion pour les sous-marins
Source : La technologie des réacteurs de propulsion navale (Fribourg, s.d.)

MODE DE PROPULSION	ENERGIE	AUTONOMIE	COMMENTAIRE
NUCLÉAIRE	$> 10^8$ kWh	> 3 ans à 20 nœuds	Engagement stratégique important et pérenne
DIESEL + BATTERIES	10^4 kWh	72 heures à 5 nœuds	Rechargeable en surface assez commodément
AIP (*) "STANDARD"	$5 \cdot 10^4$ kWh	10 jours à 6 nœuds	Stock d'O ₂ liquide Non rechargeable à la mer
AIP "MAXI"	$3 \cdot 10^5$ kWh	60 jours à 6 nœuds	Stock d'O ₂ liquide Non rechargeable à la mer

AIP = Air Independent Propulsion. De l'oxygène est stocké sous forme liquide dans des réservoirs afin de pouvoir alimenter la combustion qui requiert de l'oxygène

Il apparaît ici clairement, même si ces données sont pour des sous-marins, du potentiel d'autonomie conférer par la propulsion nucléaire. Néanmoins, en ce qui concerne la marine marchande, la vitesse n'est pas une priorité. L'objectif d'un navire marchand étant le profit économique, seul un faible intérêt est porté sur ce type de propulsion car très onéreux.

Malgré tout, certains navires civils qui ont besoin de rester pour de longues périodes en mer, sans capacité de réapprovisionnement en carburant, sont dotés de ce type de propulsion. La majorité des navires civils équipés de propulsion nucléaire aujourd'hui sont les brise-glace. Grâce à cette autonomie accrue, le navire peut rester pendant les longs mois d'hiver dans les mers gelées afin d'escorter les autres navires marchands ne pouvant pas naviguer seuls.

Chapitre 5 : Ecologie

Dans ce chapitre, nous aborderons la problématique liée à l'utilisation et aux émissions liées aux deux modes de propulsion ainsi que leurs solutions dans la marine marchande. Ensuite, afin de comprendre le risque environnemental de la propulsion nucléaire, l'analyse de l'accident du sous-marin soviétique *Koursk*. Finalement, une analyse des projets des démantèlements des navires nucléaires ainsi que la gestion des déchets irradiés.

5.1 Problématique des émissions de la combustion conventionnelle

Dans cette partie, les différentes problématiques des émissions liées à la propulsion conventionnelle seront abordées afin que les solutions apportées par l'OMI.

5.1.1 Les gaz à effet de serre

L'effet de serre est l'un des enjeux majeurs du changement climatique. C'est un phénomène naturel provoquant le réchauffement d'un système climatique. Il est majoritairement provoqué par la réfraction du rayonnement infrarouge (Tissot, 2003).

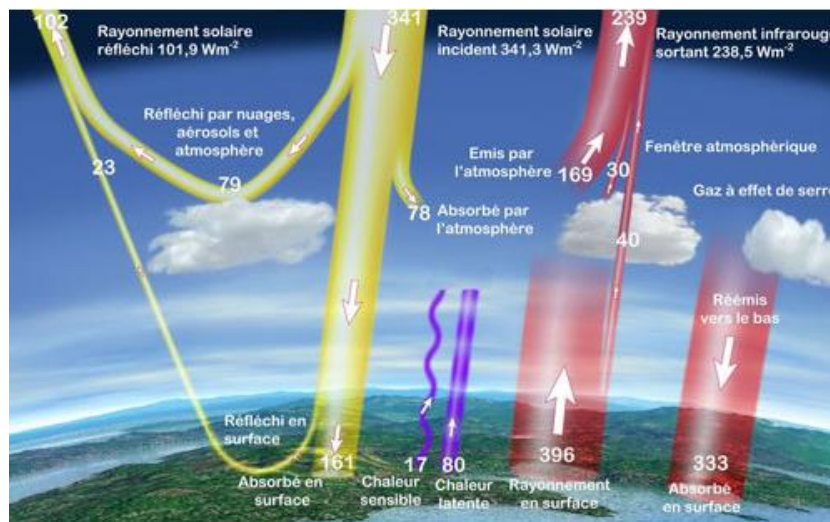


Figure 19 Représentation de la fonction de l'effet de serre.
Source : Météo France, François Poulain (s.d.)

La Figure 19, nous montre schématiquement le fonctionnement de l'effet de serre. De plus, quelques valeurs chiffrées nous renseignent sur l'importance de l'effet de serre dépendant du type rayonnement (visible, ultraviolet et infrarouge).

Les gaz à effet de serre sont présents naturellement sur Terre mais également de manière anthropique, c'est-à-dire qu'ils sont également produits par l'être Humain. Il existe une grande quantité de gaz à effet de serre qui sont produits par l'activité humaine, les plus nombreux sont (Tissot, 2003) (Stanislav, 2015) (IPCC, 2020) :

- | | |
|---|--|
| → Le dioxyde de carbone - CO ₂ | → L'hexafluorure de soufre – SF ₆ |
| → La vapeur d'eau – H ₂ O | → Les hydrofluorocarbure - HFC |
| → Le méthane – CH ₄ | → Les per-fluorocarbure – PFC |
| → Le protoxyde d'azote – N ₂ O | |

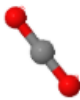
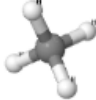



Un rapport du groupe intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC) établi une répartition en pourcentage de la quantité de gaz à effet de serre émis par l'activité Humaine. Il y est inclus une comparaison de quantité de ces gaz entre l'époque préindustrielle et l'époque actuelle (Tableau 9). Ces valeurs rendent compte de l'impact non négligeable de l'industrialisation mondiale. Afin de saisir toute l'importance de ces chiffres, voici quelques explications concernant ce tableau.

- **Part du forçage radiatif** : Est approximativement défini comme la différence entre l'énergie reçue et l'énergie émise par un système climatique. Si ce chiffre est positif, l'élément tend à réchauffer le système. Inversement, si celui-ci est négatif, l'élément tend à refroidir le système.
- **T1 et T2** : Quantité des gaz à effet de serre relevé entre 1750 et 2019.
- **La variation** : Représente le rapport d'augmentation en pourcent entre ces deux époques.
- **Pouvoir de réchauffement global (PRG)** : Cet indicateur synthétique vise à regrouper sous une seule valeur l'effet additionné de tous les polluants qui contribuent à l'accroissement de l'effet de serre. Cet indicateur est exprimé en "équivalent CO₂" du fait que par définition l'effet de serre attribué au CO₂ est fixé à 1 et celui des autres

substances relativement au CO₂. Définition du Centre Interprofessionnel Technique d'Etude de la Pollution Atmosphérique (CITEPA).

➔ **Equivalent carbone** : Quantité du gaz qui provoquerait le même forçage radiatif.

Tableau 9 Concentration passées (avant 1750) et actuelles des principaux gaz à effet de serre
Source : GIEC, CITEPA, OMM, GPC, WDCGG – Licence Creative Common Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International licence (2020, Janvier 22)

Gaz	Part du forçage radiatif	Concentration préindustrielle (t1)	Concentration actuelle (t2)	Variation (t2-t1)	Pouvoir de réchauffement global (PRG) (base 1 = CO2)	Durée de vie moyenne	Equivalent carbone (en kg)
CO2 	65 %	278 ppm	410 ppm	+ 47 %	1	5 à 200 ans	0,2727
CH4 	17 %	730 ppb	1869 ppb	+ 156 %	28	10 ans	2,3
N2O 	6 %	270 ppb	331 ppb	+ 23 %	298	131 ans	81,3
SF6 	?	?	7,9 ppt	?	22 800	3 200 ans	
PFC 	?	?	83 ppt	?	entre 2 000 à 50 000 ans	?	
HFC / HCFC 	11 %	?	123 ppt	de 1,4 à 14 800	entre 0,1 et 270 ans	?	
NF3 	12 %	0,02 ppb en 1978	0,454 ppt	2170 %	17 200	500 ans	

Il apparaît évident d'après ces quelques chiffres que l'impact de l'être Humain est non négligeable. Pour cette raison et afin de limiter l'impact écologique, la plupart des gouvernements autour du monde cherchent des solutions afin de limiter le rejet de ces gaz à effet de serre.

5.1.2 Emission de substance acidifiante

Tout comme l'effet de serre, l'acidification est un effet naturel du climat causé par des émissions de soufre venant des volcans, décomposition de matière organique, gaz produit par certaines bactéries, etc. Mais il a également été amplifié par l'augmentation de l'activité humaine. Le phénomène est plus connu sous le nom de pluie acide.

Ce phénomène est créé par l'émission d'oxyde de soufre (SOx), oxyde d'azote (NOx), Ammoniac (NH₃) et d'autres composés organiques volatiles (VOC). Il est important d'indiquer que le dioxyde de carbone (CO₂) a également la propriété d'acidifier son environnement en plus d'être un gaz à effet de serre, en présence d'eau il forme de l'acide carbonique HCO₃⁻. Ces composés sont sous formes gazeuses, en contact avec de l'eau, de l'oxygène et de l'énergie solaire. C'est alors que différentes réactions chimiques s'opèrent dans les nuages. Ceci en résulte par la formation d'acide retombant sur terre et en mer sous forme de précipitation. La Figure 20 illustre le procédé de façon simpliste.

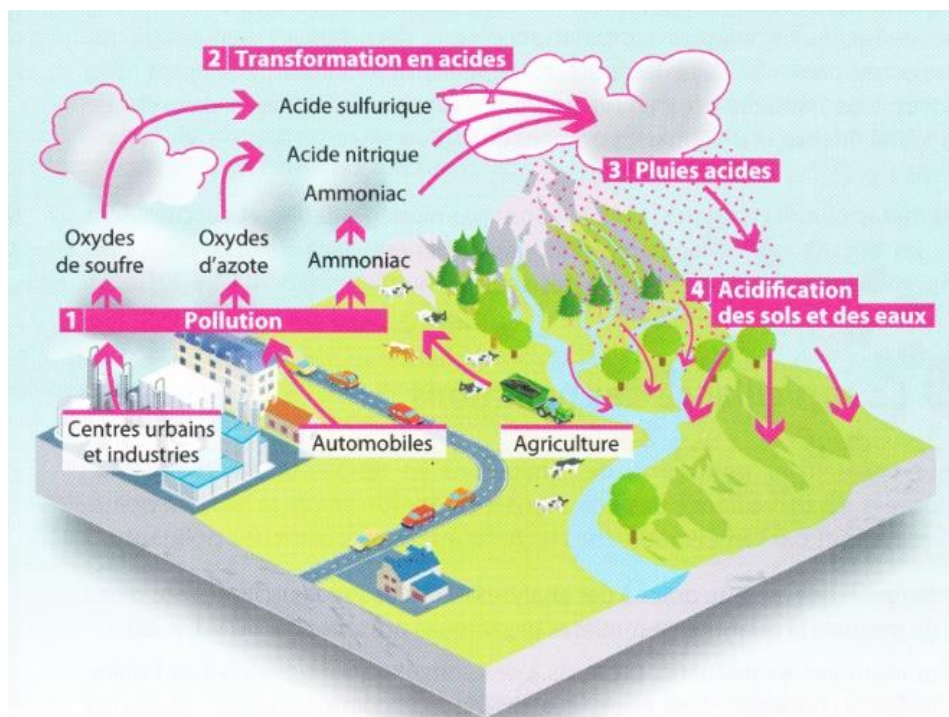


Figure 20 Représentation du procédé d'acidification de l'environnement
Source : Agence de la transition écologique (2018)

Afin de se rendre compte de l'acidification croissante, la carte suivante représente l'évolution de l'acidité des océans causés par les émissions de CO₂ anthropogénique entre les années 1700 et 1990. On constate nettement une diminution du pH ce qui signifie une augmentation de l'acidité des océans. Pour se rendre compte de l'importance de ces chiffres, il faut se rappeler que le pH est une échelle logarithmique, une diminution d'une unité sur l'échelle de pH correspond à une acidité dix fois supérieure. Si nous regardons la zone bordant la côte Européenne, nous observons une diminution du pH de -0,1 ce qui correspond à une augmentation de 10% de l'acidité de l'Océan.

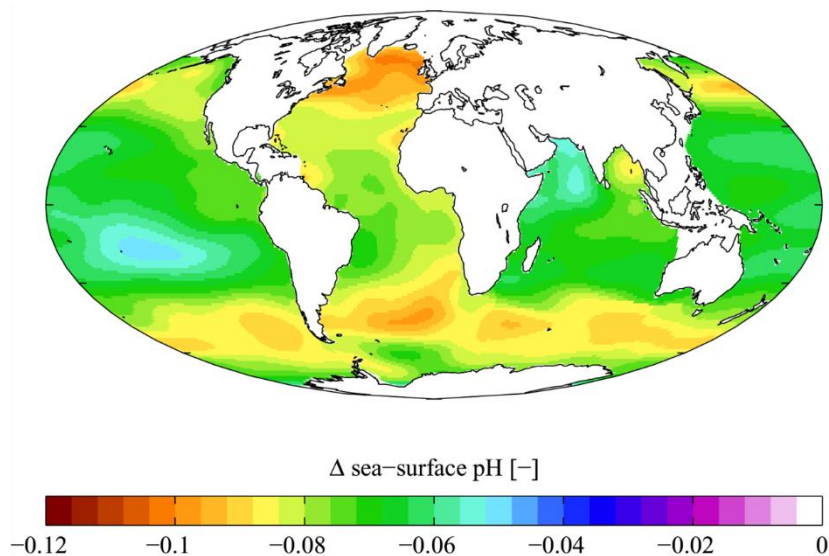


Figure 21 Variation du pH à la surface des océans entre 1700 et 1990
Source : Richard Zeebe (Creative Commons Attribution) (2007)

L'acidification est un processus complexe ayant des conséquences multiples sur les écosystèmes mondiaux, aussi bien terrestre que marin, en voici quelques exemples (Berkowitz, 2014) :

- L'eutrophication des océans.
- L'introduction de contaminant dans la chaîne alimentaire.
- Destruction de la biodiversité.
- Altération des conditions hydrographiques.
- Prolifération d'espèces invasives.
- Acidification des sols et destruction de la flore.

5.1.3 La suie et particules fines

Un troisième point est important qui doit être abordé dans le cas des émissions de la propulsion conventionnelle, est celui des particules fines. Ce sont des émissions bien qu'elles ne soient pas gazeuses, mais sous forme solide. Ces particules sont problématiques car leurs diamètres sont très petit et sont classées dans deux catégories (Marano, 2012) :

- PM_{10} : Particules inférieures à 10 micromètres. Principalement retenue par les voies aériennes supérieures.
- $PM_{2,5}$: Particules inférieures à 2,5 micromètres. Celles-ci peuvent atteindre les alvéoles pulmonaires et passer dans la circulation sanguine.

Il existe encore un troisième groupe nommé particule ultrafine dont le diamètre est inférieur à un micromètre. La Figure 22 ci-dessous, rend compte des différents types de pollutions atmosphériques qui nous intéresse et classé par tailles en micromètres (μm).

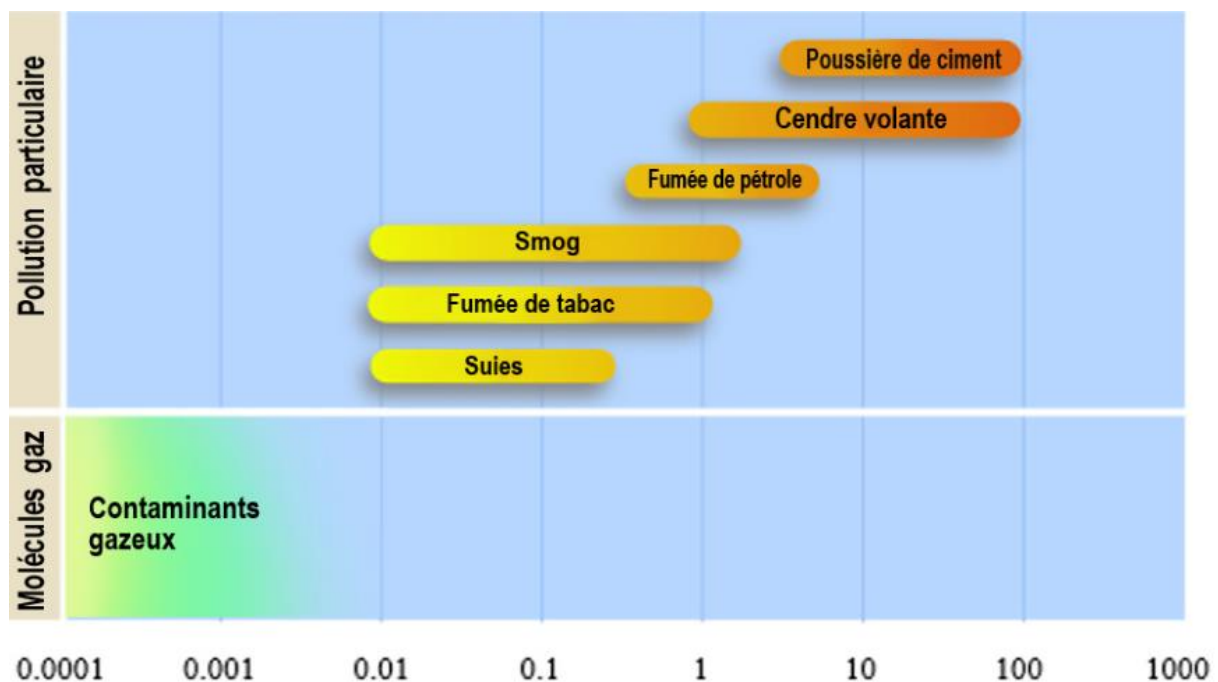


Figure 22 Classement des polluants atmosphériques selon leur taille
Source : adapté de wikipédia (CC BY-SA 4.0) (2017, mai 21)

Toutefois il existe d'autres types de pollutions atmosphériques comme les bio-contaminant (virus, bactéries, allergène, etc) et les poussières (lourde, moyenne et en suspension dans l'air). Ceux-ci n'étant pas produit par la combustion de fioul, ils ne seront pas abordés ici.

Afin de rendre compte de l'importance du trafic maritime dans l'émission de particules fines voici un relevé de la qualité de l'air aux alentours de la ville d'Anvers.

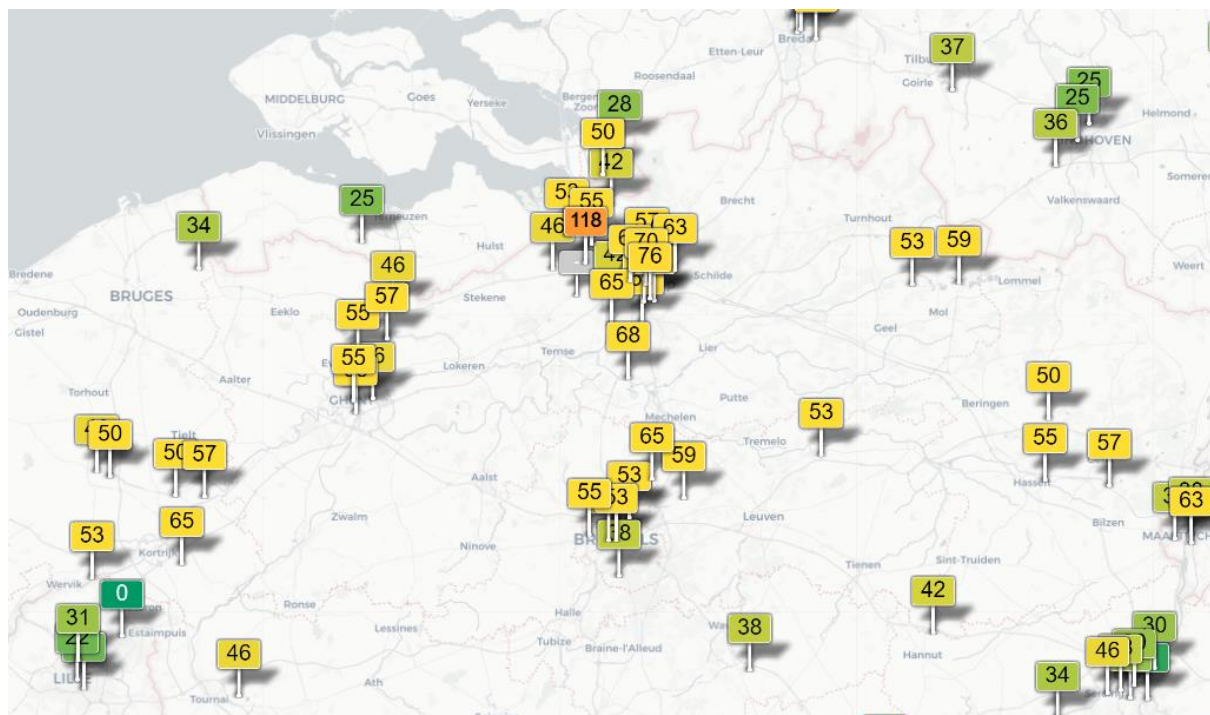


Figure 23 Carte en temps réel (2020, Mai 19 – 12h51) de la pollution atmosphérique aux particules fine.

Source: Beijing Air pollution: Real-time Air Quality Index (2020, Mai 19)

Nous y constatons un indice de 118, celui-ci est calculé sur base de la concentration en PM_{10} , $PM_{2,5}$, NO_2 et SO_2 . Malgré les restrictions sur l'utilisation du fioul lourd émis par l'OMI, le taux de particules fine reste supérieur à la moyenne des alentours.

Cette situation n'est pas unique à la ville d'Anvers, mais généralisée à tous les endroits du monde où la concentration des navires marchands est importante.



5.2 Réglementations et solutions actuelles

La Figure 24 ci-dessous représente en temps réel une partie des navires marchands sous la réglementation de l'OMI parcourant les mers afin d'assurer les échanges internationaux. Cela illustre le fait qu'il est vital au regard des conséquences écologique et sanitaire développée au point 5.1.1) à 5.1.3), que les navires doivent être réglementés concernant leurs émissions dans l'atmosphère.

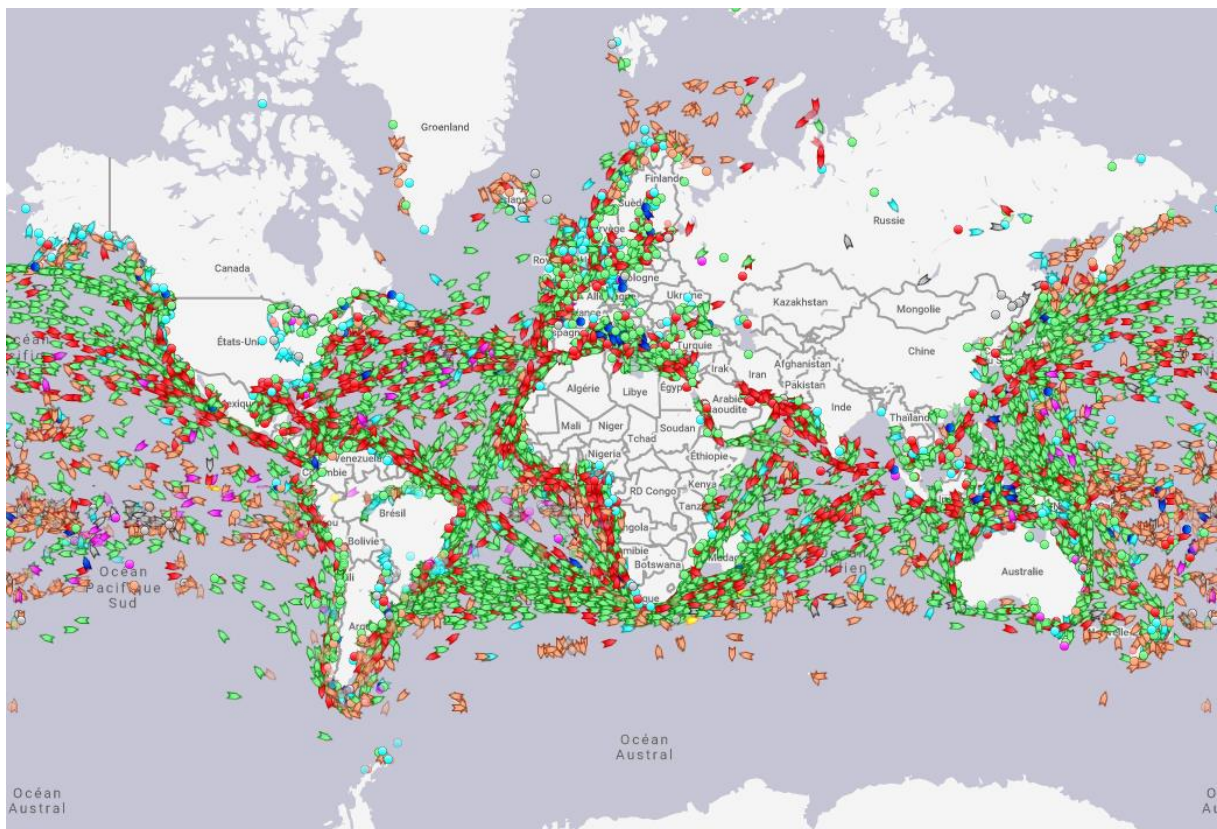


Figure 24 Capture d'écran (2020, Mai 21) du trafic maritime civile
Source : Marine Traffic (2020, Mai 21)

Dans l'objectif de réduction des gaz à effet de serre, mais aussi toutes autres pollutions de l'air générées par les navires, l'OMI s'engage à contrôler sa flotte via la convention MARPOL (Annexe VI), ainsi que plusieurs résolutions du Marine Environment Protection Committee (MEPC). Plus de précisions concernant ces réglementations et la certification des navires sont situés dans l'annexe A.

Dans le cadre qui nous concerne nous allons nous focaliser sur les émissions réglementées par l'annexe VI de la convention MARPOL : Prévention de la pollution de l'atmosphère par les navires. Les émissions contrôlées par cette annexe sont :

- Substance appauvrissant la couche d'ozone
- Oxyde d'azote NO_x
- Oxyde de soufre et particules fines SO_x

Nous allons essayer de quantifier ces substances afin de pouvoir les utiliser dans l'analyse du cycle de vie du combustible nucléaire au chapitre 6. Expliqué dans un article de la revue Atmospheric Environment, la quantification et localisation géographique de ces substances peuvent être complexe, ce pourquoi différentes méthodologies d'analyses sont utilisées (Apollonia, 2011)

- Méthode ascendante (bottom-up) : Elle consiste en une analyse partant du détail, du bas de la chaîne. On remonte progressivement les maillons afin d'arriver à une vue d'ensemble du système.
- Méthode descendante (top-down) : Elle consiste en une analyse démarrant du système dans son ensemble. Celui-ci est décomposé petit à petit pour déboucher sur un état des lieux.

Dépendant de la méthodologie utilisée, les résultats ne sont que sensiblement différents et reflètent toute l'importance d'agir face aux émissions des gaz à effet de serre et autres gaz polluants. Les chiffres suivants sont tirés du troisième rapport de l'OMI sur l'étude des gaz à effet de serre de 2014. L'OMI estimait la production annuelle en 2012 pour l'entièreté de la flotte marchande à 938 millions de tonnes de dioxyde de carbone CO₂ et de 961 millions de tonnes pour les gaz à effet de serre qui combine le CO₂, le méthane CH₄ et le protoxyde d'azote N₂O. Pour le transport international, ces valeurs s'élèvent à 796 millions de tonnes de CO₂ et 816 millions de tonnes en équivalent (CO₂) pour les gaz à effet de serre (OMI, 2014).

Le Tableau 10, nous donne un aperçu de ces valeurs d'émissions pour la période 2007-2012.

Tableau 10 Comparaison des quantités de CO₂ entre le transport maritime et production mondiale (valeurs en millions de tonnes)

Source : Third IMO GHG Study 2014

Total shipping = Entièrement de la flotte (International + domestique)

International shipping = Flotte destinée aux transport international

Third IMO GHG Study 2014 CO ₂					
Year	Global CO ₂ [1]	Total shipping	% of global	International shipping	% of global
2007	31,409	1,100	3.5%	885	2.8%
2008	32,204	1,135	3.5%	921	2.9%
2009	32,047	978	3.1%	855	2.7%
2010	33,612	915	2.7%	771	2.3%
2011	34,723	1,022	2.9%	850	2.4%
2012	35,640	938	2.6%	796	2.2%
Average	33,273	1,015	3.1%	846	2.6%

Third IMO GHG Study 2014 CO ₂ e					
Year	Global CO ₂ e[2]	Total shipping	% of global	International shipping	% of global
2007	34,881	1,121	3.2%	903	2.6%
2008	35,677	1,157	3.2%	940	2.6%
2009	35,519	998	2.8%	873	2.5%
2010	37,085	935	2.5%	790	2.1%
2011	38,196	1,045	2.7%	871	2.3%
2012	39,113	961	2.5%	816	2.1%
Average	36,745	1,036	2.8%	866	2.4%

La première partie du tableau, nous indique les valeurs d'émission de CO₂, tandis que la deuxième partie nous renseigne sur les gaz à effet de serre (CO₂equivalent) comprenant CO₂, CH₄ et N₂O.

En plus des chiffres précédents, le rapport de l'étude entre 2007-2012 annonçait une production pour l'entière de la flotte mondiale de 20,9 millions et 11,3 millions de tonnes pour les oxydes d'azote NO_x et oxydes de soufre SO_x, causant l'acidification des sols et des océans, vu au point 5.1.2) (6,3 et 5,6 millions tonnes – masse élémentaire).

Mais encore, selon le cinquième rapport de l'IPCC (AR5) datant de 2014, le transport maritime mondial est responsable à hauteur de 15% et 13% de la production mondiale de NO_x et SO_x. (IPCC, 2014). La 6^{ème} édition de ce rapport est en cours d'élaboration et nous apportera plus de réponse en 2021.

Toujours selon le 3^{ème} rapport de l'OMI, toutes ces émissions sont engendrées par la combustion de fioul fossile, cela correspondrait à une moyenne de 247 millions à 325 millions de tonnes de fioul consommé par année par tous les navires.

La variabilité de ces valeurs est dépendante de la méthodologie d'analyse comme mentionné plus haut :

- Top down : Selon la consommation qui a été définie théoriquement.
- Bottom-up : Fioul réellement utilisé par chaque navire lors de la navigation.

En lien avec la quantité de fioul qui a été consommée, mentionné ci-dessus, la quantité de CO₂ produite annuellement par la marine marchande varie donc dépendant de la méthode d'analyse. De plus la production de ses gaz étant directement liée à la combustion du fioul, la qualité de ce dernier influe également sur la quantité de gaz polluant émis.

Ce sont entre 739 millions et 795 millions de tonnes de CO₂ pour la méthode « top down » et 915 millions et 1135 millions de tonnes de CO₂ pour la méthode « bottom-up ». Ces résultats nous montrent que la croissance de la flotte mondiale augmente logiquement la consommation de carburant et que les quantités de gaz émis augmentent dans les mêmes proportions (NO_x, SO_x, PM, CO et COV) (Tableau 10). Excepté pour le méthane CH₄, qui apparaît dans la deuxième partie du tableau (CO₂e). Cela s'explique par l'augmentation du nombre de navires impliqué dans le transport de gaz naturel liquéfié, particulièrement entre 2009-2012 (OMI,2014).

En plus du CO₂ produits par le moteur du navire, une moindre quantité de ce gaz, mais significative est également produit par l'air conditionné et conteneur de type « reefer ». Cette valeur oscille entre 24,3 millions et 40,9 millions de tonnes de CO₂. Tous ces chiffres montrent la réelle implication de la marine marchande dans la production de gaz à effet de serre et les prévisions ne sont pas rassurantes.

Pour la période de 2012 à 2050 le rapport de l'OMI annonce que la production de ces gaz devrait augmenter de 50 % à 250% due à l'expansion du trafic maritime (OMI, 2014). Cette production est conséquente et risque d'engendrer des conséquences irréversibles sur le climat de la Terre. Néanmoins, l'OMI ne reste pas spectateur d'une situation alarmante qui se dégrade et prend des actions afin de réduire la pollution atmosphérique engendrée par ses navires. La production de ses gaz étant directement liée à la combustion du fioul, la qualité de ce dernier influe également sur la quantité de gaz polluant émis. Pour exemple, pas plus tard que le 01 janvier 2020, une nouvelle réglementation est entrée en vigueur, obligeant les navires naviguant les zones ECA (Annexe A) à utiliser un fioul dont la teneur en soufre est inférieure ou égale à 0,50% m/m contre 3,5 % m/m précédemment (OMI, 2016).

Si une solution a été trouvée pour les émissions de SO_x lors de la 74^{ème} session du MEPC, aucune n'a pour le moment été trouvée pour les émissions de CO₂ et la décarbonisation de la marine marchande. Toutefois une équipe d'experts doit être créée durant l'année 2020 afin de travailler sur ce problème à plein temps, dans l'objectif de respecter l'accord de Paris² entrée en vigueur le 04 novembre 2016. L'accord de Paris vise à intensifier la réponse mondiale au changement climatique et limité celui-ci en dessous de +2°C par rapport au niveau de l'ère préindustrielle.

² L'Accord de Paris s'inspire des principes de la Convention et, pour la première fois, rassemble les nations autour d'une cause commune : déployer des efforts ambitieux pour lutter contre le changement climatique et s'adapter à ses effets, avec un appui renforcé aux pays en développement leur permettant de faire de même. Il a ainsi tracé une nouvelle voie pour les actions climatiques menées au niveau mondial.

5.3 Emission de la réaction nucléaire

Après avoir pris conscience des dangers écologiques et sanitaires ainsi que les quantités de gaz émis par l'utilisation de fiouls fossiles. Nous allons nous concentrer sur les émissions liées à la propulsion nucléaire et à nouveau, tenter de quantifier ses émissions. Comme vu précédemment, la réduction des émissions liées à la combustion de fioul fossile est très complexe, beaucoup de technologies ont été développées afin de réduire ses émissions. Quelques-unes de ces technologies ont été répertoriées dans plusieurs rapports, en voici les principaux exemples au Tableau 11, (Hirdaris, 2014) (Gravina et al.,2012).

Tableau 11 Performance de la réduction des émissions dépendant de la technologie
Source : Travail personnel adapté de (Gravina et al., 2012)(Naval Architect ,2012)

Catégorie	Technologie	Pourcentage de réduction des émissions (%)			
		NO _x	SO _x	CO ₂	PM
Précombustion	Moteur à air humide	70	0	0	0
	Recirculation des gaz d'échappement	35	0	0	0
	Eau dans le fioul (max 20%)	20	0	0	40
	Fioul pauvre en soufre (0,5-2,7%)	0	80	0	20
	LNG	60	90	25	72
	Hydrogène	20	100	100	0
Combustion	Injection directe d'eau	50	0	0	50
	Modification basique du moteur	20	0	0	0
	Modification avancée du moteur	30	0	0	0
Post combustion	Réduction catalytique sélective	90	0	0	0
	Réduction catalytique assistée par du plasma	90	0	0	0
	Scrubber à eau de mer	0	75	0	25
Nucléaire	Fission	100	100	100	100
	Fusion	Technologie immature			

Les données récupérées ne mentionnent pas à quoi le pourcentage se rapporte.

Quelle serait la comparaison ? Selon la source :

L'examen s'est concentré sur les résultats rapportés et non sur la méthode utilisée. La sélection des études était basée sur une évaluation qualitative de la pertinence de l'étude à estimer les potentiels de réduction des émissions de CO₂ des différents moyens de propulsion (Naval Architect, 2012)

Nous remarquons rapidement que des solutions à moyen et long terme permettent une réduction des émissions, excepté l'hydrogène dont la technologie n'est pas encore utilisable à bord. Toutefois aucune de ces solutions ne permet une réduction maximale des émissions de la combustion de carburant fossile, excepté la technologie nucléaire qui est indiquée comme étant 100% efficace quant à la réduction des gaz polluants à l'utilisation (Carlton et al.,2010). Cette information n'est plus vraie si nous regardons toute la durée de vie de la matière fissile, de l'extraction au stockage de la matière usée. Nous allons essayer de déterminer le « coût écologique » de l'utilisation de la matière fissile au chapitre 6.

Les problèmes majeurs liés à l'utilisation de l'énergie nucléaire sont la gestion des déchets issus de la réaction nucléaire, la radiotoxicité et la durée de vie des déchets comme expliqué au chapitre 2. La gestion du combustible usé est coûteuse et complexe due à la durée de vie différente des différents déchets (vie courte et vie longue), mais aussi quant à la force de leurs émissions radioactive. De plus, mis à part continuer à stocker toujours plus de déchets nucléaires profondément sous terre, aucune solution n'est possible pour traiter ces déchets afin de les rendre moins dangereux/polluant.

Néanmoins, selon un article de 2019 écrit dans la Revue Générale Nucléaire sur les chiffres de la gestion des déchets nucléaires se veut rassurant quant à la sûreté et méthode de stockage pour les différents types de déchets :

- Déchets de faible ou moyenne activité à vie courte :

Stocké de manière rigoureuse en surface, solution sûre et pérenne.

En Belgique, un tel site de stockage existe à Dessel

- Déchets de haute et moyenne activité à vie longue :
Enfui profondément sous terre dans des configurations géologique stable
(ex : Waste Isolation Pilot plant- USA)

Toujours selon le précédent rapport, la radiotoxicité des déchets de haute activité à vie longue de vient inférieure à celle de l'uranium après 10.000 ans. De plus, masse totale de déchets de haute activité à vie longue représente 95% de toute la radioactivité générée par l'énergie nucléaire en France serait de moins de 10 tonnes. En d'autres mots, 95% de la totalité de la radioactivité produite est localisé dans cette masse de 10 tonnes.

Des données concernant la gestion des déchets nucléaire en France sont disponibles via l'Andra (Centre de stockage de l'Aube – France). Le graphique qui suit est tiré du rapport de 2018 de l'Andra et illustre la répartition des niveaux de radioactivité en fonction de son volume pour chaque type de déchets radioactifs.

Malgré de multiples tentatives de communication avec l'agence fédérale pour contrôle nucléaire afin d'avoir ces données pour la Belgique, celles – ci sont resté sans réponse, ce pour quoi je me base sur des données Française dont les données sont accessibles au public.

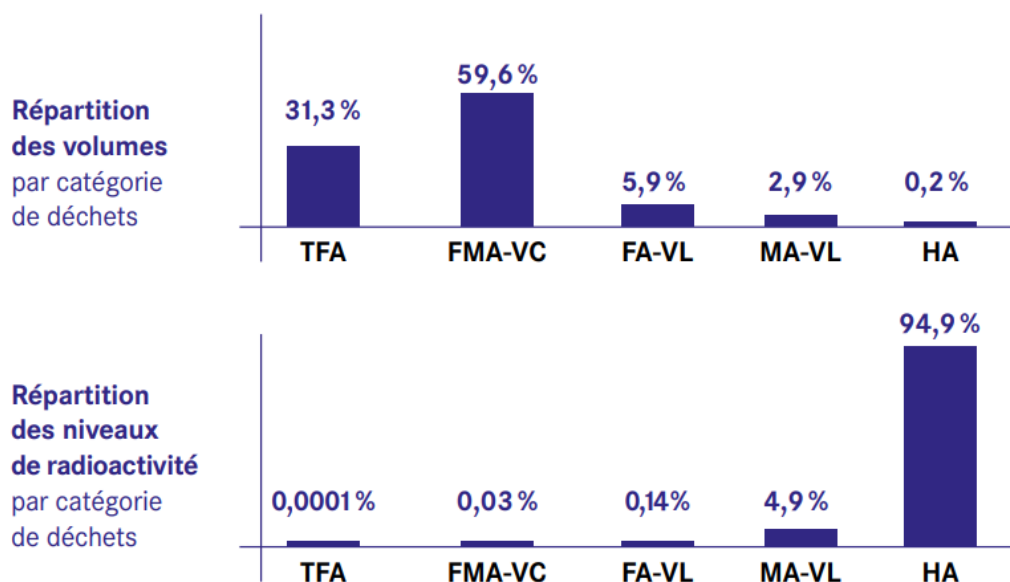


Figure 25 Graphiques de la répartition des déchets en fonction du volume et du niveau de radioactivité.

Source : Rapport d'activité 2018 (ANDRA, 2018)

TFA : Très faible activité

FMA-VC : Faible et moyenne activité à vie courte

FA-VL : Faible activité à vie longue

MA-VL : Moyen activité à vie longue

HA : Haute activité

Tous ces chiffres sont pour un volume total de 1.540.000m³ selon le rapport de l'Andra. Si nous effectuons le calcul pour les déchets de haute activité comme mentionné plus haut : 1.540.000 m³ x 0,2% = 3080m³. Nous obtenons un volume de 3080 m³, devant correspondre donc à la masse de 10 tonnes. Il est étrange de constater la différence de résultat même si nous ne sommes pas dans les mêmes unités. Aucune donnée concernant la densité ne me permet de pouvoir convertir ce volume en masse. Nous pouvons toutefois supposer que ce volume implique également la substance permettant le stockage de ces déchets. Comme par exemple la vitrification des déchets.

En plus des déchets nucléaires produit la réaction nucléaire, dans le cadre de la propulsion navale, il peut y avoir des épaves contenant du matériel irradié. Afin d'illustrer la gestion d'une telle épave le prochain point est un descriptif de la gestion de l'accident et du renflouage du sous-marin Kursk.

5.3.1 Le renflouement du Kursk

Afin d'apaiser les tensions croissantes en Russie due à la catastrophe, une première opération de sauvetage débuta afin d'aller chercher les corps des marins. Ce sont 12 corps qui furent remontés à la surface en attendant le lancement des opérations de renflouement. Plusieurs lettres ont été retrouvées sur les marins mais leurs contenus à ce jour n'ont jamais été divulgués et reste classé secret défense.

Ceci nous amène en 2001, le gouvernement Russe finit par trouver la solution afin de continuer à dissimuler les causes de la tragédie et faire croire à la transparence du gouvernement. Toutes les sociétés Russes ou Occidentales proposant de remonter le Kursk en entier furent refusées. C'est la société Hollandaise « Mamoet » qui sera finalement choisie pour le renflouage du Kursk car c'est la seule compagnie qui refusa de remonter le compartiment des torpilles. L'opération de renflouement consista donc par commencer à découper le sous-marin à 108 mètres de profondeur grâce à un système de câble robotique spécialement développé pour cette opération (Figure 26 et Figure 27) (SMIT Salvage, s.d.).

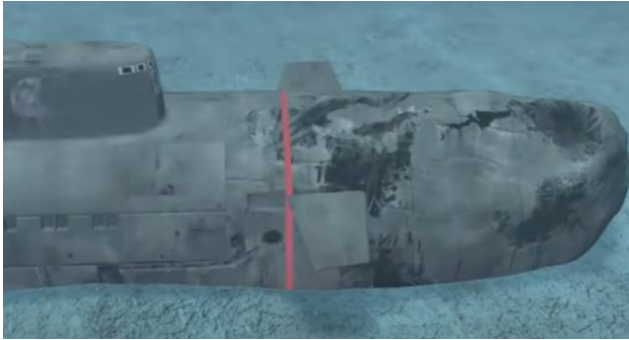


Figure 27 Projet de découpage du Kursk par la société Hollandaise Mamoet
Source : Kursk, un sous-marin en eaux troubles (Carré, 2004)



Figure 26 Vue depuis un ROV sur le câble de découpe
Source: Raising de the Kursk (SMIT salvage, s.d.)

La seconde partie de l'opération qui consista à remonter le navire à la surface prit quatre mois grâce à une barge prévue pour cette opération. La barge équipée de 26 bras de levage se sont arrimé sur des points d'ancrage préalablement forés dans la coque extérieure et intérieure du sous-marin lors d'une opération préalable effectuée par des plongeurs (Figure 28 et Figure 29) (SMIT Salvage, s.d.).

Une fois les câbles attachés à la coque du sous-marin, l'opération de levage pût débuter.

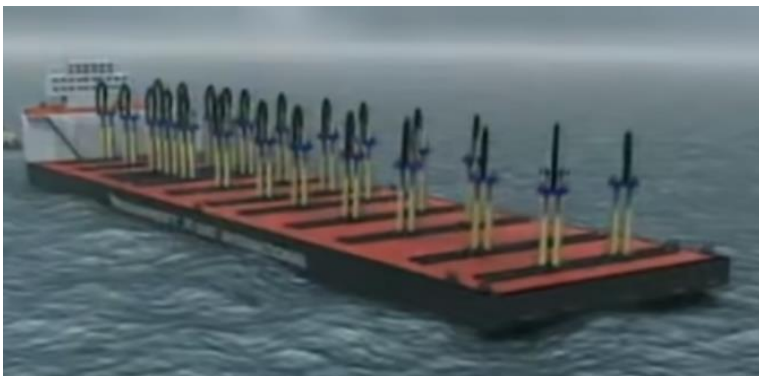


Figure 28 Barge ayant permis le renflouage du Kursk
Source: Raising de the Kursk (SMIT salvage, s.d.)



Figure 29 Installation des câbles de traction sur la coque du sous-marin.
Source: Raising de the Kursk (SMIT salvage, s.d.)

Afin de garantir la stabilité de la barge et d'éviter que celle-ci ne chavire, il a fallu que la tension soit toujours la même dans les câbles de levage et il a donc fallu remonter le sous-marin centimètre par centimètre. La barge fut également prévue pour se déplacer même brièvement avec une cargaison sous sa coque (SMIT Salvage, s.d.).

Une fois le sous-marin hissé sous la coque du navire, il fallut encore remonter les quelques derniers mètres afin de pouvoir faire entrer les deux navires dans la cale flottante destinée à accueillir le sous-marin (Figure 30). En effet, le tirant d'eau de la barge cumulé à celle du sous-marin était bien trop important pour entrer directement dans cette cale.

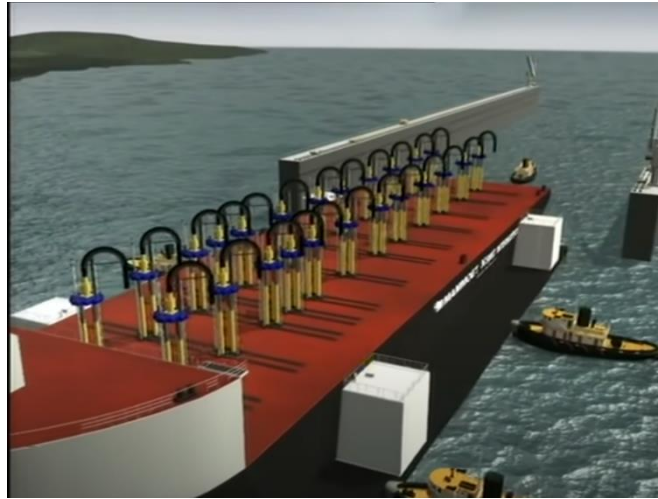


Figure 30 Barge de levage entrant dans la cale flottante destinée à accueillir le Kursk.

Source: Raising de the Kursk (SMIT salvage, s.d.)

Pour ce faire, deux énormes pontons submersibles ont été installés de part et d'autre de la barge de levage. Grâce à ces pontons, une flottabilité supplémentaire a été donnée à la barge afin de la surélever et pouvoir ainsi entrer dans la cale. Le Kursk fut finalement remonté à la surface quatre mois après le début des opérations. Ce fut et cela reste encore à ce jour l'une des opérations de renflouage les plus techniques réalisées (SMIT Salvage, s.d.).



Figure 31 Archive de la commémoration du Kursk après le renflouage
Source: Raising de the Kursk (SMIT salvage, s.d)

5.3.2 Le démantèlement et conséquence du naufrage

Après toutes ces opérations, il a fallu démanteler le sous-marin. Ceci n'étant pas une opération facile due au fait de sa propulsion nucléaire et donc beaucoup de parties étant irradiées. De plus, une certaine incertitude planait sur la possibilité de fuite radioactive provenant des deux réacteurs. Ce faisant, plusieurs analyses d'eau extraite depuis le compartiment du réacteur ont dissipé tous les soupçons et cela confirma que les réacteurs nucléaires ont bien été arrêté comme il était prévu par la procédure.

Il est compliqué de trouver des documents d'archives concernant le démantèlement du Kursk spécifiquement, c'est pourquoi ce sujet sera abordé de manière générale au point 5.4.

La conséquence manifeste et la plus grave de cet accident n'était pas l'accident en tant que tel, mais l'incapacité de la marine Soviétique à pouvoir mener de façon autonome une opération de sauvetage et de renflouage d'un navire de guerre. Selon beaucoup d'experts, le manque de moyens et d'équipements de sauvetage était catastrophique. De plus la condition précaire de la marine soviétique, à savoir, les conditions de logement, les salaires des marins, l'état insalubre des logements de fonction et l'état vieillissant des navires de la marine soviétique aurait participé directement à l'accident. (Kramnik, 2015).

C'est finalement en 2018, lors d'une interview en direct entre Vladimir Poutine et un journaliste que celui-ci dévoilera officiellement la « véritable histoire du Kursk » à savoir : Un incendie se serait déclaré dans le compartiment des torpilles entrant l'explosion d'une de ses dernières.

5.4 Gestion des déchets en fin de vie

Le démantèlement est une étape incontournable de la vie de tous les navires. Dans le cas des navires à propulsion nucléaire, cette étape est d'autant plus importante tenant compte de la contamination radioactive de certaines parties du navire, majoritairement le compartiment du réacteur.

Il faut faire une première distinction entre 2 étapes bien distinctes : le démantèlement, cette étape est directement reliée à la sécurité nucléaire, et la déconstruction, celle-ci vise à traiter la coque du navire ou sous-marins séparé de ses compartiments réacteur (Mampey, 2016).

Le démantèlement est une opération sensible au point de vue de la sécurité nucléaire, techniquement délicate à réaliser, mais maîtrisée, notamment sur les plans de la radioprotection et du traitement des déchets. En revanche, la gestion de la coque libérée de son installation nucléaire après contrôle n'entraîne plus de contraintes particulières sur le plan de la sécurité nucléaire (DGA, 2010)

Le démantèlement se fait donc en plusieurs étapes afin de garantir la sécurité nucléaire.

1. La mise à l'arrêt définitif :

Cette opération pouvant durer plusieurs mois, débute quand le navire arrive dans la cale de démantèlement. L'objectif consiste à décharger le cœur du réacteur nucléaire et de débarquer les différentes énergies³. La matière fissile, composant le réacteur est généralement placée dans une piscine permettant d'absorber les rayonnements (Figure 32)



Figure 32 Piscine de stockage des matières fissiles irradiées
Source : Philippe Collet, IRSN (2018)

³ Débarquer les différentes énergies : Terme utilisé dans un document de la DGA. Signifie que toutes les installations, produits, etc. Pouvant libérer de l'énergie sont débarqués afin de limiter tous risques d'incendies, explosion, électricité statique, etc.

2. Démantèlement de niveau 1 :

Cette étape est préparatoire au démantèlement en lui-même. L'opération consiste à installer du matériel de surveillance ainsi que de l'équipement de radioprotection. Tout le matériel non contaminé de la tranche réacteur est également débarqué.

3. Démantèlement de niveau 2 :

Durant cette étape, les protections biologiques sont renforcées et une décontamination avancée est opérée, tous les fluides composant le circuit primaire sont vidangés (Figure 14). L'étape suivante qui peut prendre un an dépendant de la contamination radiologique, consiste à isoler le compartiment du réacteur au moyen de cloisons métalliques soudées. Une fois cette étape terminée, l'isolation radiologique est mesurée. Si celle-ci est conforme à la sécurité nucléaire, la découpe peut débuter. La découpe en elle-même prend environ trois mois et consiste à séparer la tranche réacteur du reste du navire ou sous-marin. La tranche, une fois isolée du reste du navire, peut être transportée jusqu'à son lieu d'entreposage (Figure 33)



Figure 33 Extraction de la tranche réacteur d'un SNLE, avant d'être ressoudée
Source : Direction Général de l'Armement Français (2016)

4. Entreposage de longue durée :

Dans le cas du sous-marin nucléaire Français *Le Redoutable*, la tranche réacteur est entreposée dans une salle sismo-résistante et sous haute surveillance depuis quinze ans. Un monitoring constant permet de s'assurer à tout moment de la sécurité nucléaire. Cette étape est envisagée pour quelques dizaines d'années, il faudra attendre la décroissance radioactive pour pouvoir passer au 3^{ème} niveau de démantèlement.

5. Démantèlement de niveau 3 :

Tous les matériaux et équipement irradié sont finalement enlevés, découpés et entreposés dans des fûts de déchets nucléaires. Cette opération devant être effectuée dans un entrepôt prévu pour la gestion des déchets nucléaire. A ce jour, cette étape n'a pas encore été menée et est encore à l'étude par le commissariat de l'énergie atomique. La suite des études devrait indiquer la faisabilité du stockage de la tranche réacteur ainsi que du futur transport des déchets radioactifs.

6. La déconstruction :

Cette étape ne prend pas en compte la tranche du réacteur mais le reste de la coque, néanmoins, une autorisation reçue des autorités nucléaires est requise afin de procéder au recyclage du reste de la coque du sous-marin. Cette opération techniquement très complexe nécessite encore des études afin de s'assurer de la protection de l'environnement. En effet, chaque coque fait une longueur de plus de 100 mètres, 10 mètres de diamètre pour un poids de plus de 7000 tonnes.

7. Gestion sur le long terme :

D'après les autorités nucléaires, le démantèlement de niveau 2 du premier sous-marin français *Le Redoutable* sera achevée d'ici les dix prochaines années. D'autres sous-marins regagneront dans la prochaine décennie le même procédé de recyclage. Ceci souligne le fait que la propulsion nucléaire est encore très récente pour certain pays et que la gestion des déchets nucléaires est encore à l'essai. Toutefois, il est important de souligner que dans l'état actuel, les opérations de démantèlement sont un succès et que

la sécurité nucléaire est garantie pour la population. La gestion et le financement de la sécurité du nucléaire et de ses déchets est à la charge des états (Agence Fédéral de Contrôle Nucléaire – AFCN, en Belgique) supervisé par l’Agence International de l’Energie Atomique (AIEA). Malgré une nouvelle tentative afin d’avoir des chiffres de la gestion des déchets nucléaire en Belgique, ma demande est restée sans réponse.

Chapitre 6 : Analyse de cycle de vie du combustible nucléaire

L'analyse du cycle de vie est une méthodologie d'évaluation afin de pouvoir comparer les impacts environnementaux selon plusieurs critères (danger, étude d'impact, déchets, ...) tout au long du processus de l'utilisation de matière fissile. Une ACV se base sur :

- Une analyse complète des filières (« du berceau » à « la tombe »).
- Traduction des résultats obtenus en impacts potentiels sur l'environnement.
- Reconnu internationalement par le système CEE de management environnemental et d'audit (norme ISO 14 001).

Selon la norme précédente une ACV se développe en quatre phases :

- Phase 1 : Objectifs et champs de l'étude
- Phase 2 : Bilan matières – énergie (inventaire)
- Phase 3 : Analyse des impacts
- Phase 4 : Interprétation

Une analyse ce cycle de vie complète est un procédé très complexe pouvant prendre plusieurs années et impliquant une grande quantité d'experts ainsi qu'une grande quantité de données qui sont souvent compliquées à obtenir. De plus, une analyse de cycle de vie implique des calculs complexes qui ne sont pas à la portée de mes compétences. Toutefois je m'appuierais sur les conclusions de ces analyses de cycles de vie ainsi que toutes les données abordées plutôt dans cette thèse afin de pouvoir répondre à la question dans le chapitre 3 : Est-il possible de remplacer la propulsion conventionnelle par la propulsion nucléaire de façon durable ?

6.1 Objectif de l'étude

Notre but ici est de comparer les impacts environnementaux entre deux systèmes « rivaux » à savoir la matière fissile, ne produisant pas de gaz polluant durant son utilisation, mais dont les déchets radioactifs sont présents pour une longue période et la propulsion conventionnelle dont l'utilisation produit une grande quantité de gaz polluant, mais dépourvu de déchets post- réaction comme la réaction nucléaire. Il s'agira d'identifier lequel de ces deux modes respecte le mieux l'environnement et ceci tout au long de leur cycle de vie. Une analyse de cycle de vie écologique s'effectue selon une méthode nommée « EcoIndicator 99 » (Annexe B) et analyse l'impact d'un processus selon 12 critères, dans le cadre de cette thèse, seulement deux seront abordé :

- Consommation d'une énergie fossile non renouvelable
- Effet de serre

Nous avons pu noter au point 5.2 que la marine marchande utilisait 247 millions à 325 millions de tonnes de fioul chaque année. L'utilisation seul de ces fiouls produit 938 millions de tonnes de dioxyde de carbone CO₂ et de 961 millions de tonnes pour les gaz à effet de serre qui combine le CO₂, le méthane CH₄ et le protoxyde d'azote N₂O, également mentionné au point 5.2.

Aujourd'hui, le plus populaire des types de réacteur nucléaire nécessite entre 0,1 et 0,3 kWh_{th} (moyenne 0,2 kWh_{th}) afin de pouvoir produire 1 kWh_{el}. Ce qui correspond à une moyenne de 65g CO₂-eq/kWh_{el}. Cette valeur est significativement supérieure pour les technologies utilisant du combustible fossile, pouvant aller de 600 à 1.200 CO₂-eq/kWh_{el}. Cette valeur est bien supérieure à l'énergie éolienne et hydroélectrique 15 à 25 CO₂-eq/kWh_{el} ou encore l'énergie solaire (environ 90 CO₂-eq/kWh_{el}) (Lenzen, 2008). Toutefois, l'énergie hydroélectrique, éolien et solaire ne sont pas encore optimisées pour le commerce maritime La démarche suivante consistera à quantifier l'énergie globale ainsi que l'intensité des gaz à effet de serre.

6.2 Bilan matière - énergie

Nous devons donc déterminer la quantité de chacune de ces énergies utilisées ainsi que les émissions de gaz à effet de serre émis lors de toute leur durée de vie. La première étape de la vie d'un carburant/matière fissile est sa fabrication. Lors de la fabrication de la matière fissile, il faut extraire, fraiser, convertir, enrichir et finalement donner une forme utilisable à la matière fissile produite. Un schéma (Figure 34) simple du cycle de vie de l'uranium nous montre le nombre d'étapes nécessaires à la production de matière fissile.

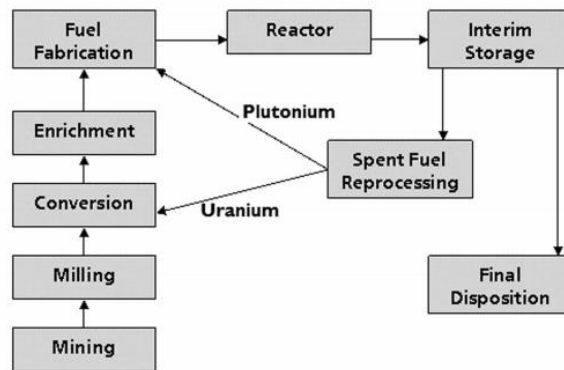


Figure 34 Cycle de vie de la matière fissile

Source: Comparative life cycle assessment of hydrogen and other selected fuels (Kevork et al., 2012)

Chacune de ces étapes nécessite de l'électricité et donc produit des gaz à effet de serre. Venant d'un article analysant plusieurs cycles de vie du combustible nucléaire, les analyses donnent des résultats qui varient entre 3,5 et 100 g CO₂-eq/kWh (Vasilis & Hyung, 2007). Nous observons une grande variabilité dans ces mesures. Celle-ci est principalement due à la méthode d'enrichissement utilisée pour l'uranium ainsi que de la qualité du minerai d'uranium (pe : Australie = 0,2% d'uranium & Canada = 12,7% d'uranium). Cela s'explique également par la provenance de l'électricité servant à effectuer chacune de ces étapes. Dans l'exemple de la Suisse et de la Suède, qui sont des sociétés quasiment libres de l'utilisation de combustible fossile (respectivement, 51% hydroélectrique plus 43% nucléaire et 60% hydroélectrique plus 37% nucléaire). Cela explique un impact moindre en CO₂.

Une autre explication mentionnée dans cet article est que pour certaines analyses, les données ne sont pas disponibles. Dans l'exemple de la Suisse, aucune donnée n'est disponible sur les émissions de CO₂ lié à la gestion des déchets nucléaires ou encore venant de la construction d'installations nucléaires (Vasilis & Hyung, 2007) (Carlton et al, 2011). Une dernière explication mentionnée dans le cadre de la variabilité des mesures sont les émissions liées à la conception même des centrales nucléaires.

Pour construire ces centrales, il faut beaucoup d'acier et de béton et dont leur production produit également du CO₂. La Figure 35 nous renseigne sur les chiffres résultant des analyses de cycle de vie, ainsi que sur la variabilité des mesures.

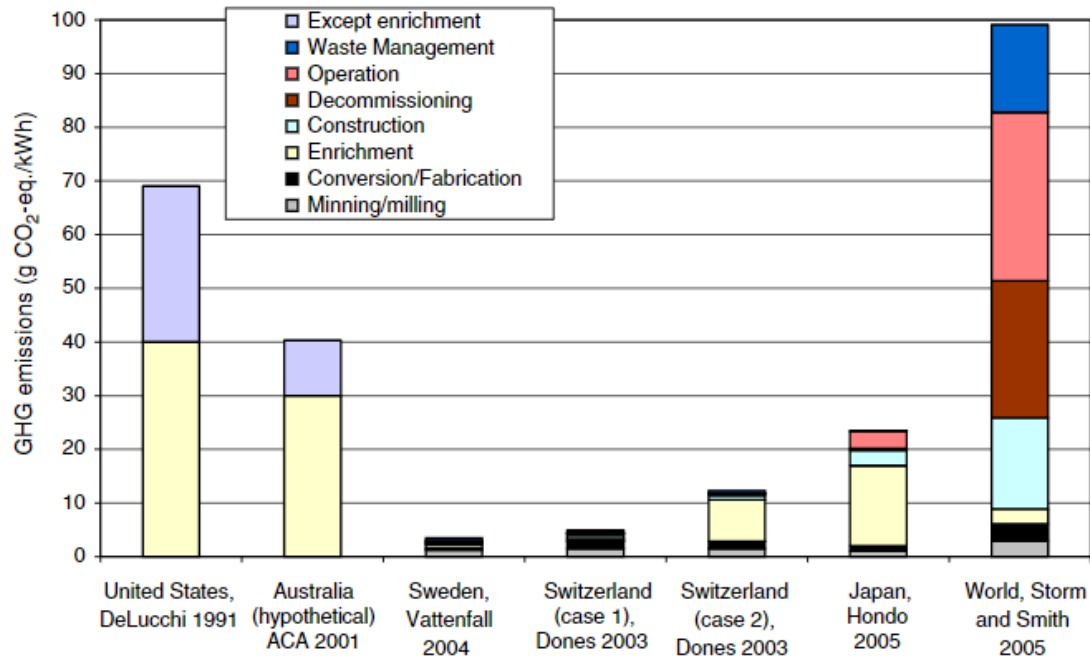


Figure 35 Comparaison de plusieurs cycles de vie du carburant nucléaire
Source: Greenhouse-gas emissions from solar electric- and nuclear power: A life-cycle study (Vasilis & Hyung, 2007)

Toutefois, malgré l'importance des recherches effectuées pour ce rapport, les auteurs à l'origine de cet article précisent que beaucoup de données sont encore manquantes et que de futures analyses pourraient préciser ces estimations. Il est donc difficile de pouvoir chiffrer précisément les émissions de gaz à effet de serre lié à l'utilisation de l'énergie nucléaire.

D'après plusieurs littératures, la teneur moyenne en uranium dans les sols serait en moyenne entre 1-5g d'uranium (également entre 3-20g de thorium) pour une tonne de terre et de roche. Dans de riches gisements, cette concentration peut monter jusqu'à 1kg d'uranium par tonne. Pour avoir un point de comparaison, une tonne d'eau de mer contient environ 3 mg d'uranium (Martinez-Val & Piera, 2007). (Lenzen, 2008).

L'énergie nécessaire à l'extraction de ce minerai est exprimée GJ/t U et peut s'étaler entre 292-8774 GJ/t U dépendant du grade⁴ de l'uranium. Cette énergie est séparée en deux types d'énergie distincts :

- Energie direct : Energie requise pour mettre en œuvre l'exploitation de la mine.
(ex : Forage, extraction, déplacement du minerais)
- Energie Indirect : alimentation, matériel d'entretien, etc.

Tableau 12 Energie spécifique requis pour l'extraction d'une tonne d'uranium dépendant de sa concentration
Source: Travail adapté de (Lenzen, 2008)
SA = Schist Argileux

Référence	Roche	GJ/t Ore	GJ/t U @0,3%	GJ/t U @0,2%	GJ/t U @0,1%	GJ/t U @0,01%
Energies direct						
(Rotty et al, 1974)	Minerai	0,61	292	439	877	8774
(Rotty et al, 1974)	SA	0,10	47	70	141	1410
Energies Indirect						
(Rotty et al, 1974)	Minerai	0,76	362	542	1085	10.847
(Rotty et al, 1974)	SA	0,30	143	214	428	4282
Energie Totale						
(Chapman, 1974)	Minerai	1,21	403	605	1210	12.100
(Rotty et al, 1974)	Minerai	1,37	654	981	1692	19.621
(Rotty et al, 1974)	SA	0,40	190	285	569	5692

La somme des énergies directes et indirectes nous renseigne donc sur la quantité d'énergie nécessaire à l'extraction d'une tonne d'uranium pure (composé de différents isotopes).

La prochaine étape dans le processus de formation du combustible nucléaire est nommée « milling » (fraisage). Cette étape se fait généralement proche du site d'extraction du minerai afin d'éviter le transport de matières premières sur de longues distances, ce qui représente un coût énergétique plus important.

⁴ Concentration d'uranium présent dans une tonne de minerais, généralement exprimée en pourcentage.

Le processus consiste à broyer et lessiver le minerai afin d'extraire l'uranium (UO₂) grâce à des produits chimiques (Martinez-Val & Piera, 2007). Deux méthodes existent pour le lessivage de l'uranium, la première avec des substances alcalines et la seconde avec des substances acides, un aperçut des deux méthodes est disponible en Annex C.

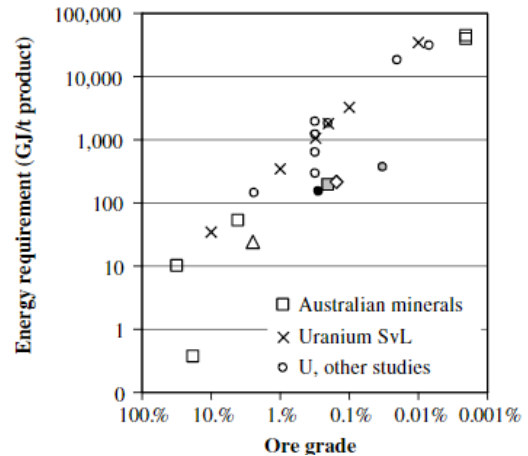


Figure 36 Energie requise pour l'étape du fraisage dépendant du grade de l'uranium.

Source: Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy (Lenzen, 2008)

Cette étape de fraisage ne se fait pas sans utilisation d'énergie et est variable dépendant du

grade l'uranium. Cette valeur d'énergie oscille entre 10-50.000 GJ/t de produit. Les études qui ont été menées sur différents grades de minerais en attestent comme le graphique (Figure 36) tiré d'un rapport sur les cycles de vies et gaz à effet de serre lié à l'énergie nucléaire ou encore le Tableau 13

Dépendant de la littérature consultée, nous pouvons à nouveau noter que comme dans le cas du minage, la volatilité des valeurs énergétique requise pour le fraisage du minerai dépendant de son grade, ici entre 375-19.204 GJ/t U.

Tableau 13 Energie spécifique requis pour le fraisage d'une tonne d'uranium dépendant de son grade

Source: Travail adapté de (Lenzen, 2008)

SA = Schist Argileux

Référence	Roche	GJ/t Ore	GJ/t U @0,3%	GJ/t U @0,2%	GJ/t U @0,1%	GJ/t U @0,01%
<i>Energies direct</i>						
(Rotty et al, 1974)	Minerai	0,82	390	585	1169	11.695
(Rotty et al, 1974)	SA	0,69	327	491	981	9811
<i>Energies Indirect</i>						
(Rotty et al, 1974)	Minerai	0,53	250	375	751	7509
(Rotty et al, 1974)	SA	0,39	186	279	559	5589
<i>Energie Totale</i>						
(Chapman, 1974)	Minerai	1,13	375	563	1125	11.250
(Rotty et al, 1974)	Minerai	1,34	640	960	1920	19.204
(Rotty et al, 1974)	SA	1,08	513	770	1540	15.400

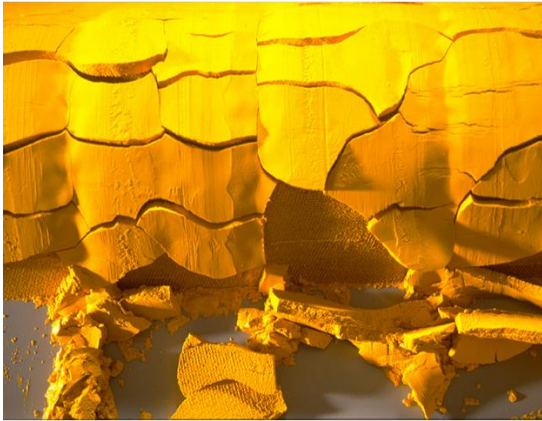


Figure 37 Résultat de l'opération de fraisage.
Source : L'amont du cycle du combustible nucléaire
(Synatom, s.d.)

Après l'étape de fraisage, le minerai d'uranium peut atteindre une concentration allant jusqu'à 80%. De couleur jaune, cette substance est nommée « yellow cake ». Elle n'est pas plus radioactive que l'uranium naturelle car elle contient toujours plus de 99% d'uranium-238 dont la radioactivité est très basse (Lenzen, 2008).

Suivant l'étape du fraisage, nous arrivons à l'étape d'enrichissement de l'uranium qui vise à augmenter la concentration d'isotope d'uranium-235 en le séparant des autres isotopes non fissiles, comme expliqué au point 4.3.2. Le dioxyde d'uranium (UO_2) est converti en hexafluorure d'uranium (UF_6) en phase gazeuse afin de pouvoir être enrichi. Plusieurs méthodes sont faisables pour arriver à enrichir l'uranium : Centrifugeuse à gaz, diffusion gazeuse, laser, EMIS et la méthode aérodynamique. Comme pour les deux étapes précédentes, les valeurs d'énergies requises peuvent être très variables dépendant de la méthode utilisée mais aussi par l'implémentation de certains coûts dans les analyses.

Il est important de noter que contrairement aux Tableau 12 et Tableau 13 dont les valeurs d'énergies sont exprimée en MJ/t U, ici l'énergie est exprimée sous une unité non standardisée (SWU- Separative Work Units). En français, UTS- Unité de Travail de Séparation. Cette unité est expliquée dans la source ayant fourni les valeurs nécessaires à notre analyse. En quelques mots, cette unité représente le travail nécessaire à l'enrichissement isotopique d'un mélange Un exemple utilisé par la source :

Afin de produire 10 kg d'uranium de grade 4,5% en uranium-235, en permettant un taux d'épuisement⁵ de 0,3% requièrent 100 kg d'uranium naturel et 62 SWU. Si un taux d'épuisement de 0,2% est demandé, cela réduit la quantité d'uranium naturel nécessaire à 83 kg mais augmente le SWU à 76 (Lenzen ,2008).

⁵ Taux d'épuisement : Quantité d'uranium-235 encore présente dans des déchets appauvris après l'étape d'enrichissement du combustible. C'est un paramètre qui peut être ajusté aux besoins économiques, en fonction du coût de l'uranium naturel ainsi que des coûts d'enrichissement (WISE uranium project, 2007).

Tableau 14 Energie requise pour l'enrichissement de l'uranium

Source : Travail adapté de (Lenzen, 2008) C = Centrifugeuse à gas, D= Diffusion gazeuse, L = Laser, E = Emis, A = Aérodynamique.

Type	kWh _{cl} /kg - SWU	Commentaires	Reference
C	170	Convertit en utilisant 3,5 SWU par kg 3% U	(Heinloth, 1997)
C	50	N/A	(WNC, 2006)
C	62,3	Installation Ureco, UK. Inclus « Infrastructure and capital works”	(WNC, 2006)
C	250	N/A	(Wagner, 1978)
C	282	Inclus les investissements dans l'installation	(Wagner, 1978)
C	75	N/A	(Dones et al., 1996)
C	40	Installation Ureco en Europe et TENEX en Russie	(Dones et al., 2004)
D	2860	Convertit en utilisant 3,5 SWU par kg 3% U	(Heinloth, 1997)
D	2330-2737	N/A	(Rombourg, 1975)
D	2100-3100	N/A	(Weis et al., 1990-
D	2500	N/A	(WNC, 2006)
D	2420	N/A	(Chapman, 1974)
D	+ - 2520	Inclus les coûts capitaux	(Chapman, 1974)
D	2810	N/A	(Rotty, 1975)
D	3050	Inclus les coûts de construction de l'installation, carburant fossile et matériaux de fabrications	(Rotty, 1975)
D	3080	N/A	(Wagner, 1978)
D	2400	N/A	(Dones et al., 1996)
D	2400	Installation Eurodif, France	(Dones et al., 2004)
D	2600	USEC (Paduchah) USA	(Dones et al., 2004)
L	700	N/A	(Heinloth, 1997)
E	+ - 25.000	N/A	(WNC, 2006)
A	3000-3500	N/A	(Heilnoth, 1983)
A	>3000	N/A	(WNC, 2006)
A	3080	N/A	(Wagner, 1978)

Autrement dit si nous reprenons la citation précédente, quand le prix de l'uranium est bas, le taux d'épuisement sera plus élevé et vice-versa. En matière de balance énergétique du cycle de vie du combustible nucléaire, cela signifie qu'un faible taux d'épuisement faible (grande quantité d'uranium) engendre une moindre consommation d'énergie dans les opérations de minage, fraisage et conversion tandis que cela augmentera la consommation de l'opération d'enrichissement et vice-versa.

L'étape suivante dans le processus est la création du combustible nucléaire. Cette étape consiste à préparer les barres de combustible alimentant les réacteurs. Ce sont des tubes d'environ 4m scellé hermétiquement, environ 100 de ces barres composent le cœur d'un réacteur nucléaire.

Tableau 15 Energie requise pour la préparation du combustible nucléaire
Source: Travail adapté de (Lenzen, 2008)

	Energie électrique (MWh _{cl} /tU)	Energie Thermique (GJ _{th} /tU)	Energie totale (GJ _{th} /tU)
Portée	48 - 301	3 - 6170	635 - 7985
Moyenne	145 ± 106	1403 ± 1966	2970 ± 2835

6.3 Analyse des impacts

Dans une étude menée par (Lenzen, 2008), sur l'énergie et l'intensité des émissions de gaz à effet de serre lié aux réacteurs nucléaires (LWR et HWR). Il estime le besoin d'un parc nucléaire hypothétique à 3370 MW_{el} pour une production de 25.000 GWh_{el} par an. Également mentionnée par la source précédente, la production de gaz à effet de serre tout au long du cycle de vie du combustible nucléaire se situerait à une moyenne de 65 gCO_{2e}/kWh_{el}. (10-130 gCO_{2e}/kWh_{el})

Nous pouvons donc estimer l'impact la production annuelle de gaz à effet de serre de ce parc nucléaire :

$$65 \text{ [gCO}_2\text{e/kWh}_{el}] / 1000 = 0,065 \text{ [gCO}_2\text{e/Wh}_{el}] * 10^9 = 6,5 * 10^7 \text{ [gCO}_2\text{e/GWh}_{el}]$$

$$(6,5 * 10^7 \text{ [gCO}_2\text{e/GWh}_{el}] * 25.000 \text{ [GWh}_{el}]) = 1,625 * 10^{12} \text{ [gCO}_2\text{e].}$$

Cela représente une quantité de 1.625.000 tonnes de CO_{2e} par an en moyenne.

Comparé au charbon, le plus polluant (environ 820 gCO_{2e} / kWh_{el}) (Sibelga, 2020), pour la même quantité d'énergie (25.000 GWh_{el}), cela produirait une quantité de 205.000.000 tonnes de CO_{2e}. Une différence de 203.375.000 tonnes de CO_{2e} « économiser ». Nous pouvons conclure que selon ces estimations, le nucléaire serait environ 125 fois moins polluant que le charbon.

La plupart des navires à propulsion nucléaire aujourd'hui ont une puissance entre 10-200 MW_{th} (Mégawatts thermiques). Cette puissance peut monter jusqu'à 300 MW_{th} pour les plus grands sous-marins et porte-avions. Cette puissance thermique développe une puissance électrique entre 35-50 MW_{el}. Pour illustrer les émissions de la propulsion nucléaire, je m'inspire des données du brise-glace nucléaire Yamal.



Figure 38 Brise-glace nucléaire Yamal
Source: The Yamal- a nuclear powered icebreaker (CC-BY-SA 3.0) (Cool Antarctica, s.d.)

Composé de deux réacteurs nucléaires contenant chacun 245 barres de combustibles. Cela équivaut à 500 kg de combustible par réacteur. En naviguant à pleine puissance contre de la glace fine, il peut consommer 300 g d'uranium par jour.

Grâce à une tonne d'uranium, le brise-glace est suffisamment chargé pour 5 années d'opération sans remplacement de barres de combustible. La puissance contenue dans ses réacteurs produit une puissance de 25.000 CH et sont au nombre de trois, soit 75.000 CH. Cela équivaut à une puissance de 55,3 MW_{el} (Cool Antarctica, s.d).

Nous pouvons utiliser ces chiffres afin de calculer la quantité émise de gaz à effet de serre.

Puissance électrique moyenne = 55,3 [MW_{el}] = 55,3 * 10³ [kW_{el}]

$$65 \text{ [gCO}_2\text{e/kWh}_{el}] * 55,3 * 10^3 \text{ [kW}_{el}] = 3,5945 * 10^6 \text{ [gCO}_2\text{e/h]}$$

Cela représente une quantité de 3,59 tonnes de CO₂ par heure.

Soit 86,27 tonnes CO₂ par jour ou 31.488,55 tonnes CO₂ par an et 157.442,75 tonnes CO₂ pour 5 ans ce qui correspond à la durée de vie complète du cœur des deux réacteurs.

Ces calculs sont une estimation de la production de gaz à effet de serre liée à l'utilisation de l'uranium durant tout son cycle de vie et ne reflètent pas l'entièreté du secteur maritime nucléaire. Toutefois les valeurs nous permettent d'illustrer le potentiel de l'énergie nucléaire quant à la réduction des gaz à effet de serre.

Nous allons comparer le coût en fioul/matière fissile pour les deux types de propulsion. Lors de la navigation avec un moteur à propulsion conventionnelle, la consommation d'un navire peut augmenter très rapidement avec la vitesse comme en atteste le graphique ci-dessous.

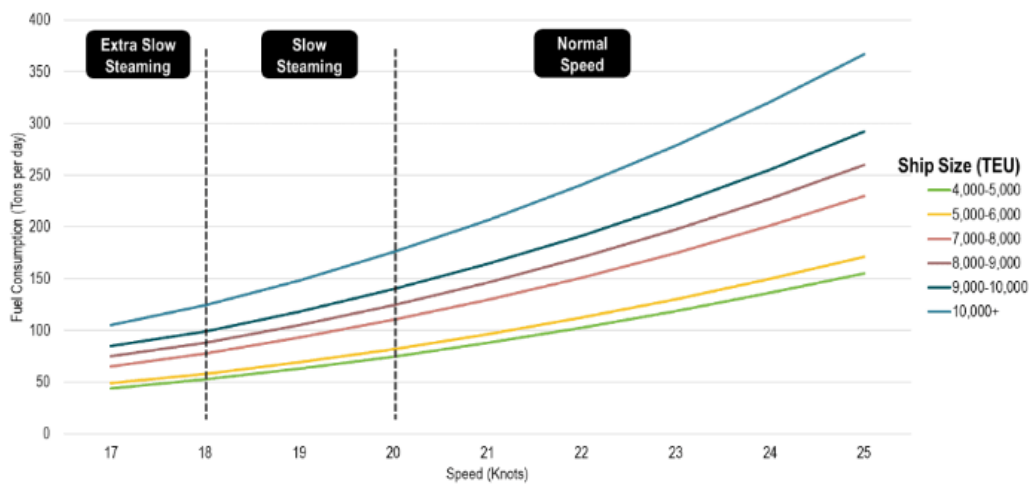


Figure 39 Evolution de la consommation en carburant en tonnes par jours en fonction de la vitesse
Source : adapté de Notteboom, T. and P. Carriou (2009) "

Si on choisit une vitesse constante de 20 nœuds, en une journée, le navire aura parcouru 480 miles nautiques et consommé une quantité d'environ 125 tonnes de fioul. Pour un navire porte-conteneurs de 8.000-9.000 TEU.

Le calcul suivant sera évidemment théorique et ne prend pas en compte la multitude de facteurs pouvant augmenter la consommation d'un navire. Nous nous baserons toutefois sur ce chiffre afin de le comparer à ceux de la propulsion nucléaire. Rapportée à un jours la consommation équivaut donc à environ 125 tonnes de fioul.

Le calcul suivant, selon les données de l'OMI en 2012 la consommation de carburant était entre 247-325 millions tonnes de tonnes de fioul pour une production de 938-961 millions de tonnes de CO₂e. Donc, en moyenne 286 tonnes de fioul pour 949,5 millions de tonnes de CO₂e.

Cela nous donne une émission moyenne de 3,31 tCO₂/t fioul.

$3,31 \text{ [tCO}_2\text{/t fioul]} * 124,98 \text{ [t fioul/jour]} = 413,75 \text{ tonnes de CO}_2 \text{ par jour à une vitesse 20 nœuds.}$
Par an = 151.019 tonnes de CO₂/an.

Cette valeur n'est pas très représentative car elle suppose que le navire avance à 20 nœuds constant durant une période de 365 jours. De plus, beaucoup de paramètres comme la résistance totale du navire, la météo, etc, pouvant influencer la consommation n'ont pas été pris en compte. Toutefois elle servira de point de comparaison face aux navires à propulsion nucléaire quant aux émissions de gaz à effet de serre.

Afin d'ajouter un exemple plus concret, si nous prenons les données d'un moteur diesel marin à deux temps, leurs puissances peuvent atteindre la puissance de 80 MW. Dans le but de pouvoir comparer les valeurs d'émission de CO₂ à la propulsion nucléaire nous utiliserons la puissance fournie par le brise-glace *Yamal* soit, 55,3 MW. Les données énergétiques pour le diesel sont tirées d'une annexe d'une étude sur l'identification de substances dangereuses menée par l'IEEP (Institute for European Environmental Policy) (Valsecchi et al., 2009).

Emission de CO₂ lié à la combustion de 1 kg de diesel = 2,67 kg de CO₂⁶

HHV = 44,9 MJ/kg diesel

LHV = 42,3 MJ/kg diesel

$44,9 * 10^6 \text{ [J/kg]} = 12,47 \text{ [kWh/kg diesel]}$

1 kWh = 3.600.000 J

$55,3 * 10^6 \text{ [W]} / 12,47 * 10^3 \text{ [Wh/kg]} = 4434,64 \text{ kg diesel /h}$

$4434,64 \text{ [kg diesel /h]} * 2,67 \text{ [kg CO}_2\text{/ kg diesel]} = \underline{11.840 \text{ kg CO}_2\text{/h}}$

⁶ La valeur calculée avec les chiffres de l'OMI en 2012 nous donne une moyenne de 3,31 kg de CO₂ par kg de fioul, le rapport de l'IEEP une valeur de 2,67 kg de CO₂ par kg de diesel

Un navire à propulsion conventionnelle ayant une puissance de 55,3 MW produit donc environ 11,84 tonnes de CO₂ par heure. Soit 284,16 tonnes de CO₂ par jour. Soit 103.718,4 tonnes de CO₂ par an. Cette valeur est CO₂ par uniquement vraie pour l'utilisation du carburant et non pour tout le cycle de vie du carburant comme c'est le cas dans le calcul effectué pour la propulsion nucléaire. Aux 284,16 tonnes de CO₂ par jour, il est nécessaire d'ajouter encore la quantité de de CO₂ lié à l'exploitation du pétrole ainsi qu'au cycle de vie du carburant.

Pour rappel, nous avons calculé la valeur 86,27 tonnes CO₂ de par jours liée à tout le cycle de vie du combustible nucléaire contre 284,16 tonnes de CO₂ par jour pour un navire à propulsion conventionnelle seulement pour l'utilisation du fioul.

6.4) Interprétation des résultats

En réponse à la décarbonisation, l'énergie nucléaire est prometteuse. Néanmoins, il est important de préciser avant d'interpréter ces résultats, qu'une analyse de cycle de vie (ACV) écologique comporte 12 points d'intérêt (Annexe B). Nous n'avons finalement analysé que deux des aspects d'une ACV écologique, la consommation d'une énergie et la production de gaz à effet de serre. De plus, une ACV écologique fait partie d'un ensemble d'ACV, se composant d'une ACV écologique, économique et social. Mais encore, d'après les sources consultées pour les ACV, cette science est relativement nouvelle et mérite d'être encore amélioré afin d'obtenir des résultats plus précis même s'il nous donne de bonnes estimations.

Nous avons donc estimé avec les chiffres en notre possession que le navire brise-glace *Yamal* à propulsion nucléaire produirait 31.488,4 tonnes de gaz à effet de serre par an, et cela tout au long du cycle de vie du combustible nucléaire. Je pense néanmoins que cette valeur est sous-estimée compte tenu de la problématique de la gestion des déchets nucléaire qui s'étale sur plusieurs milliers d'années. Car rappelons-le, appart entreposer les déchets nous n'avons pas encore de solution viable afin de les éliminer.

Pour l'utilisation de carburant fossile, nous avons calculé les émissions dues seulement par l'utilisation du carburant. Ce navire à propulsion conventionnelle produirait 103.718,4 tonnes de CO₂, ce qui fait de l'énergie nucléaire une bonne solution énergétique quant au sujet de la décarbonisation.

Tableau 16 Récapitulatif des émissions de CO₂ estimée par an pour un navire ayant une puissance de 55,3 MW.
Source : Travail personnel

Propulsion	Quantité de CO ₂ / an (t /an)
Conventionnelle	<u>103.718,4</u> tonnes de CO ₂ par an (<u>Utilisation du carburant seulement</u>)
Nucléaire	31.488,55 tonnes CO ₂ par an (<u>pour tout le cycle de vie</u>)

D'après les chiffres obtenus et les calculs effectués, cela équivaut à une production de CO₂ 70% moindre pour un moteur à propulsion nucléaire par rapport à propulsion conventionnelle. Nous pouvons aisément supposer qu'il s'agit d'une sous-estimation. Je n'ai pas obtenu de valeurs concernant la production de CO₂ lié au cycle de vie du diesel, ce qui aurait par conséquent augmenté la quantité de CO₂ produit par la propulsion conventionnelle. De ce fait cela aurait augmenter le pourcentage de réduction des émissions de CO₂ lié au cycle de vie de l'uranium.

Chapitre 7 : La propulsion nucléaire, une solution aux émissions de la propulsion conventionnelle ?

7.1 Discussion

Nous avons donc pris conscience de la problématique écologique, sanitaire et économique liée à l'utilisation d'énergie fossile dont nous dépendons encore à hauteur de 85%. La projection de l'augmentation de son utilisation n'est pas rassurante compte tenu des quantités connues d'émission de gaz à effets de serre et autres substances nocives. Ce sont en 2012, 961 millions de tonnes pour les gaz à effet de serre CO_{2e} causant une partie du réchauffement climatique, mais également 20,9 millions de tonnes et 11,3 millions de tonnes de NO_x et SO_x causant pluies acides et acidification des océans qui ont été rejeté dans l'atmosphère. Ces chiffres sont conséquents et uniquement liés à l'utilisation de fioul fossile dans la marine marchande qui pour le rappeler est responsable à hauteur de 3,3% des émissions de gaz à effet de serre mondial, transport international et domestique confondu.

Il n'existe aujourd'hui aucune solution définitive quant à la décarbonisation complète de la marine marchande bien que beaucoup de technologies sont développées afin de réduire les émissions liées à la propulsion conventionnelle. La propulsion nucléaire est aujourd'hui envisageable et continue d'évoluer (cfr thorium). C'est également une des seules méthode à ne produire aucun gaz à effet de serre lié à son utilisation. Toutefois le nucléaire produit des gaz à effets de serre tout au long de sa durée de vie, comme le montre les différentes données récupérées ainsi que les calculs hypothétiques qui ont été mené. Malheureusement, il nous est impossible de réellement quantifier en détail les avantages des réacteurs au thorium car aucun de ces réacteurs n'a été développé à l'échelle industrielle et requiert encore beaucoup de développement.

Pour le brise-glace *Yamal* dont la puissance électrique est de 55,3 MW, produirait sur un an si ses réacteurs tournaient à plein régime 31.488,55 tonnes CO₂ par an lié au cycle de vie de l'uranium. Un navire à propulsion conventionnelle s'il naviguait à une vitesse de 20 nœuds produirait sur la même période, uniquement par l'utilisation du fioul, 103.718,4

tonnes de CO₂ par an. A cela, il faut encore ajouter les gaz à effets de serre liés à l'exploitation, production, transport, stockage, etc. Même sans cette valeur les émissions de CO₂ liés à la propulsion nucléaire son 70% moindre que la propulsion conventionnelle.

Il apparaît donc clairement, même si ces calculs sont hypothétiques, que l'énergie nucléaire pourrait apporter une solution franche à la décarbonisation et aux émissions de gaz à effet de serre. Toutefois, malgré ce net avantage écologique, le problème majeur du nucléaire qui ne se « pose pas » dans le cas des énergies fossile réside dans la gestion des déchets nucléaire. En France, ces déchets représentent un volume total de 1.540.000 m³. De toute la radioactivité créée, 95% se concentre dans 0,2% du volume total appelé déchet de haute activité à vie longue, soit 3080m³, présent pour 10.000 ans avant d'atteindre la radioactivité de l'uranium naturelle. Malheureusement, aucune donnée n'est disponible quant à la quantité de déchets provenant de la propulsion nucléaire. Néanmoins, une possible solution à ce problème a été entrevu dans la technologie des réacteurs au thorium qui peut utiliser combustible composée d'une partie des déchets à longue vie des réacteurs « classiques ».

Même si une majorité de personnes y voit un désavantage à avoir à gérer les déchets nucléaires, j'arrive à y trouver un avantage. L'énergie nucléaire produit des déchets solides qu'il nous est possible de gérer, stocker en attendant de trouver une solution quant à leur élimination. Contrairement aux déchets de la combustion fossile qui sont émis dans l'atmosphère « sans gestion ».

S'il n'y a pas de chiffre de la « gestion des déchets » de la propulsion conventionnelle, il est impossible de les comparer aux chiffres de la gestion des déchets nucléaire.

Un dernier sujet important que je n'ai pas eu la capacité d'aborder dans une étude de durabilité est l'impact que le nucléaire a sur la société. L'impact social est un paramètre d'une analyse de durabilité qui est impossible à chiffrer. Nous sommes capables de calculer un impact économique ou écologique et d'en mesurer les effets. Nous est-il possible de donner une valeur à l'éthique, comme la prise de responsabilité ou encore la conscience sociale ? Cela est encore plus vrai pour l'énergie nucléaire. Il est difficile de pouvoir chiffrer les conséquences sociales d'un accident nucléaire, sachant que celles-ci seront présentes pour plusieurs milliers d'années.

7.2 Conclusion

La problématique de la transition énergétique est claire. Que ce soit au niveau écologique, sanitaire ou économique, il est capital pour les décennies à venir de trouver une solution viable aux énergies fossiles dont nous dépendons encore majoritairement. Pour le moment aucune solution viable n'est disponible afin de rendre l'Humanité indépendante de cette source d'énergie. Toutefois, une solution a été entrevue dans l'énergie nucléaire dans son potentiel de réduction des gaz à effet de serre, ainsi que comme tremplin la transition écologique et énergétique vers la prochaine étape la plus claire, la fusion nucléaire.

La propulsion nucléaire bien que très efficace, n'équipe pas une majorité de la flotte marchande mondiale. Cela peut s'expliquer de plusieurs manières :
Premièrement, l'avantage majeur de la propulsion nucléaire est de pouvoir à opérer à très haute vitesse pendant de très longue période (théoriquement, la durée de vie du combustible). Cet avantage n'est pas nécessaire aux navire marchand « commun » car leur but est de voyager de port en port et cela sur des durées particulièrement courtes au regard de la longévité du combustible nucléaire pouvant atteindre plusieurs années.

Deuxièmement, du fait de cette longue durée de vie du cœur du réacteur, il est possible aux navires nucléaires de rester isolés de long mois sans aucun problème d'alimentation électrique. Il existe toutefois en plus des navires nucléaires militaires, un certain nombre de brise-glaces ainsi que quelques pétroliers opérant dans l'océan arctique où les avantages apportés par l'énergie nucléaire deviennent primordiaux.

Troisièmement, la gestion des déchets nucléaire reste un dossier sensible pour le « grand public » fortement marquée par deux accidents nucléaires très médiatisés, l'accident de Tchernobyl et Fukushima.

Quatrièmement, une opinion plus personnelle pense qu'il est très difficile d'implémenter de nouvelle réglementation au sein d'une organisation comme l'OMI car il

faut pouvoir rassembler beaucoup de monde autour de la même idée. Ce qui peut être très compliqué dépendant des intérêts économiques de chaque membre.

Finalement, avec les données que j'ai récoltées, il est possible de pouvoir remplacer la propulsion conventionnelle par la propulsion nucléaire. Elle l'une des solutions quant à l'émission des gaz à effet de serre et un moyen de transition vers un monde moins dépendant des énergies fossiles. Toutefois, la gestion des déchets à long terme reste un problème majeur qui entrave la durabilité de cette technologie et qui selon moi ralentit son développement.

Pour conclure, il est important de préciser que je n'ai analysé que peu d'aspects de ces deux modes de propulsion et que beaucoup d'études et recherches doivent encore être faites quant à la durabilité de l'énergie nucléaire.

Bibliographies

- Acton, J. (2007) Silence is Highly enriched uranium. Consulté le 19 Avril 2020. URL : <https://www.armscontrolwonk.com/archive/601738/silence-is-highly-enriched-uranium/>
- Agence Fédérale de Contrôle Nucléaire. (2019, Février 12). *Exposition moyenne annuelle aux rayonnements ionisants en Belgique*. Consulté le 29Avril, 2020. URL :<https://afcn.fgov.be/fr/dossiers-dinformation/radioactive/exposition-moyenne-annuelle-aux-rayonnements-ionisants>
- Amara, R. (2011). Impact de la pollution sur les écosystèmes côtiers : exemple de la Manche orientale. *Vertigo*, 9. DOI : 10.4000/vertigo.10990
- Apollonia, M., & Biagio, C. (2011). Estimating air emissions from ships: Meta-analysis of modelling approaches and available data sources. *Atmospheric Environment*. 45(13). 2242-2251. DOI : 10.1016/j.atmosenv.2011.01.046
- Berkowitz, H. (2014) Acidification des océans et changement climatique, les enjeux pour la gestion. *Le Libellio d’Aegis*, 10(4) .29-35. ISSN 2268-1167
- Bindoff, N.L., Cheung, W.W.L., Kairo, J.G., Arístegui, J., Guinder, V.A., Hallberg, R., Hilmi, N., Jiao, N., Karim, M.S., Levin, L., O’Donoghue, S., Purca Cuicapusa, S.R., Rinkevich, B., Suga, T., Tagliabue, A., & Williamson, P. (2019). Changing Ocean, Marine Ecosystems, and Dependent Communities. *Dans: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [Pörtner, H.O., Roberts, D.C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegría, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., Weyer, N.M. (eds.)] Consulté en ligne 17 Mai 2020 URL:https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/09_SROCC_Ch05_FIN_AL-1.pdf
- Bourguignon, M., Bérard, P., Bertho, J.M., Farah, J., & Mercat, C. (2017). Radioprotection : quel avenir ? *Radioprotection*, 52(1), 13–20. DOI : 10.1051/radiopro/2017007
- BP. (2019). *Statistical review of World Energy*, 68, 42-45. Consulté en ligne le 13 Mai 2020. URL : <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>
- Brieu, L. (2010). Combustion et combustible. *Energie plus*. Consulté le 19 Mai 2020 URL : <https://energieplus-lesite.be/theories/chauffage11/combustion-et-combustibles/>
- Brimblecombe, P. (1996). Air Composition and Chemistry (2^{ème} éd.). *Press syndicate of the University of Cambridge*. Consulté le 20 juillet 2020. ISBN 0 521 45366 6

- Candaes, R. (2001, Juillet). *Impact des énergies fossiles*. Consulté le 03 Mai 2020. URL : <http://www.protegeonslaterre.com/impact-des-energies-fossiles/>
- Carlton, J.S., Smart, R., Jenkins, V. (2011). The nuclear propulsion of merchant ships: Aspects of engineering, science and technology. Aspect of engineering, science and technology, *Journal of Marine Engineering & Technology*, 10(2),.47-59.
DOI: 10.1080/20464177.2011.11020247. ISSN : 2056-8487
- Carré, J.M. (réalisateur). *Koursk : Un sous-marin en eaux troubles*, 2004, 1h10min.
URL :<https://www.youtube.com/watch?v=l1IMG1rPeyQ>
- Chapman, P.F. (1974). Energy analysis of nuclear power stations. *Energy policy*, 3(4). 285-299. DOI : 10.1016/j.enpol.2008.04.017
- Dedes, E., Turnock, S.R., Hudson, D.A. & Hirdaris, S. (2011). Possible power train concepts for nuclear powered merchant ships. *LCS 2011: International Conference on Technologies, Operations, Logistics and Modelling for Low Carbon Shipping, Glasgow City, United Kingdom. 21 - 23 Jun 2011*. 261-274.
- Delacroix, D., Guerre, J.P. & Leblanc, P. (2012). *Guide pratique radionucléides et radioprotection (Nelle édition) : Manuel pour la manipulation de substances radioactives dans les laboratoires de faible et moyenne activité*. EDP Sciences.
- de Mestral, J.C. (28 Novembre 2013). *L'énergie du thorium, l'avenir vert du nucléaire ?* TEDxParis. Paris. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=Z0G8QxaYRds>
- Dones, R., Gantner, U., Hirschberg, S., Doka, G., Knoepfel, I. (1996). Environmental inventories for future electricity supply systems for Switzerland. PSI Bericht Nr. 96-07. Villingen, Switzerland: Paul Scherrer Institut. ISSN 1019-0643
- Dones, R., Bauer, C., Bolliger, R., Burger, B., Heck, T., Röder, A., Emmenegger, M.F., Frischknecht, R., Jungbluth, N. (2004). Life cycle inventories of energy systems: results for current systems in Switzerland and other UCTE countries. Data v1.1. Dübendorf, Switzerland: PSI and ESU-services. DOI : 10.1065/lca2004.12.181.2
- Hector, C. (2016). *Les effets biologiques des rayonnements ionisants*. Paris: Pôle Santé Travail.
- Heinloth, K. (1983). *Energy*. Stuttgart, Germany: B.G. Teubner.
- Heinloth, K. (1997). *The energy questions*. Braunschweig, Vieweg, Germany. ISBN 3-528-03106-9

- Dufour, F. (2018). *Les coûts et implications de notre demande d'énergie : Une analyse comparée et complète des ressources énergétiques disponibles*. Consulté en ligne le 10 Aout 2020. URL : https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3189740
- Gravina, J., Blake, J.I.R., Shenoi, A., Turnock, S.R., & Hirdaris, S.E. (2012). Concepts for a modular nuclear-powered containership. In: *17th International Conference on Ships and Shipping Research*, Napoli, Italy. DOI: 10.13140/RG.2.1.1096.3288
- Halvor, S. & Kenn, S. (2017). Nuclear propulsion in ocean merchant shipping: The role of historical experiments to gain insight into possible future applications. *Journal of Cleaner Production*, 169, 152-160. DOI : 10.1016/j.jclepro.2017.05.163
- Hirdaris, S.E., Cheng, Y.F., Shallcross, P., Bonafoux, J., Carlson, D., Prince, B. & Sarris, G.A. (2014). Considerations on the potential use of Nuclear Small Modular Reactor (SMR) technology for merchant marine propulsion. *Ocean Engineering*, 79, 101-130. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2013.10.015
- International Maritime Organisation. (2018). Class 7 - Radioactive material. Dans IMO, *IMDG code: International maritime dangerous goods code*, 1, Edition 2018, 87-110. London: IMO.
- International Maritime Organisation (2008) *MARPOL Annex VI: Regulation for the prevention of air pollution from ships*. Consulté le 22 Mai 2020
URL : http://dmr.regs4ships.com/docs/international/imo/marpol/ann_06/index.cfm
- International Maritime Organisation (2020) *Sulphur Cap 2020 / MARPOL annex VI / Cleaner shipping for cleaner air*. (1,27min). Consulté le 22 Mai 2020
URL : <http://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>
- International Maritime Organisation (2020, Janvier 01) *Sulphur 2020 - Cutting sulphur oxide emissions*. Consulté le 22 Mai 2020.
URL : <http://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>
- International Maritime Organisation (2016, 25 Juillet). *Air pollution and energy efficiency. Assessment of fuel oil availability – final report* (MEPC 70/5/3). IMO. Consulté le 17 Aout 2020. URL : <http://www.imo.org/en/OurWork/Documents/MEPC%2070-INF.6%20-%20Assessment%20of%20fuel%20oil%20availability.pdf>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, Pachauri, R.K & Meyer, L.A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151. ISBN 978-92-9169-143-2
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2020). *Climate Change and Land. Chapitre 2*, 131-247. Consulté le 24 Juillet 2020. URL : <https://www.ipcc.ch/srccl/>. ISBN 978-92-9169-154-8

- Künzli, N., Kaiser, R., Medina, S., Studnicka, M., Chanel, O., Filliger, P., Herry, M., Horak, F., Puybonnieux-Textier, V., Quénel, P., Schneider, J., Seethaler, R., Vergnaud, J.C. & Sommer, H. (2000). Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment. *Lancet*, 356(9232), 795-801. DOI:10.1016/S0140-6736(00)02653-2
- Kuo, W. (2015). *Fiabilité de l'énergie renouvelable et nucléaire*. ISBN: 978-1-78406-054-1
- Kramnik, I. (2015). *Le naufrage du Kursk : Causes, théories, conséquences*. Consulté le 15 Avril 2020. URL : <https://sptnkne.ws/cw2S>
- Landrieu, G. (2014). *Les impacts des énergies fossiles sur l'environnement*. Entretien de la Vilette « L'énergie : un concept des usages et des enjeux » Paris, France. INERIS – 00971919 Consulté le 03 Mai 2020. URL : <https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00971900>
- Lenzen, M. (2008). Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review. *Energy Conversion and Management*, 49, 2178-2199. DOI : 10.1016/j.enconman.2008.01.033
- Lung, M. & Otto, G. (1998). Perspectives of the thorium fuel cycle. *Nuclear Engineering and Design*, 180(2), 133-146. DOI: 10.1016/S0029-5493(97)00296-3
- MAMPAEY, L (2016). *Démantèlement des armes et bâtiments nucléaires : terrifiant héritage pour les générations futures*, Note d'Analyse du GRIP, 20 juin 2016, Bruxelles. Consulté le 30 Avril 2020. URL : https://www.grip.org/sites/grip.org/files/NOTES_ANALYSE/2016/NA_2016-06-20_FR_L-MAMPAEY.pdf
- MARANO, F. (2012, Novembre). *Session 1 : Les particules fines et leurs effets sur la santé : ce qu'il faut savoir*. Pollution atmosphérique - Numéro spécial, 20-23. Consulté le 19 Mai 2020 URL : [http://grandest.appa.asso.fr/docs/1/fckeditor/file/Revue/PollutionAtmospherique/Hors-serie-particules-novembre-2012/p--%20Marano\(1\).pdf](http://grandest.appa.asso.fr/docs/1/fckeditor/file/Revue/PollutionAtmospherique/Hors-serie-particules-novembre-2012/p--%20Marano(1).pdf)
- Martiner-Val, J. & Piera, M. (2007). Nuclear fission sustainability with hybrid nuclear cycles. *Energy Conversion and Management*, 48, 1480-1490. DOI 10.1016/j.enconman.2006.12.007
- Moltz, J. (2006). NTI Building a safer world: *Global Submarine Proliferation: Emerging Trends and Problems*. Consulté le 21 Avril 2020 URL : <https://www.nti.org/analysis/articles/global-submarine-proliferation/>
- Murray, R.L. (2009). An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Processes. *Nuclear Energy*, 6th edition, ISBN: 978-0-12-370547-1, Published by Butterworth - Heinemann (Elsevier Inc.), USA

- Naval Architect, (2012). Green Shipping - Exhaust Emissions Prediction and Mitigation. The Naval Architect.
- Organisme Mondial de la Santé. (1983). *L'effet sur la santé des différents types d'énergie : Le défi d'ici la fin du siècle*. Publication régionales, Série Européenne, N°19 ISBN 92 890 2110 1. ISSN 0250-8575.Consulté le 03 Mai 2020
URL : http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0004/156073/WA30_2F.pdf
- Pike, J. , Vick, C., Jacobowski, M. & Garrett, P. (2000) Project 949A Antey/Oscar II
Consulté le 23 Avril 2020URL : <https://fas.org/nuke/guide/russia/theater/949.htm>
- Rombourg, C.T., & Koen, B.V. (1975). Total energy investment in nuclear power plants. *Nuclear Technologie*, 26, 5-11. DOI: 10.1016/j.enconman.2008.01.033
- Rotty, R.M., Perry, A.M. & Reister, D.B. (1975). Net energy from nuclear power. IEA Report IEA-75-3. Oak Ridge, TN, USA: Institute for Energy Analysis, Oak Ridge Associated Universities.
- Rousseaux, P., & Tiberiu, A. (2000). *Valeur environnementale de l'énergie*, 2-8. ISBN 2-88074-437-7
- Sherman, R. (2000). *Nuclear propulsion*. Consulté le 20 mai 2020 URL : <https://fas.org/man/dod-101/sys/ship/eng/reactor.html>
- SIBELGA, (2020). *A quoi correspond une tonne de CO₂ ?* Consulté en ligne le 13 Aout 2020
URL : <https://www.energuide.be/fr/questions-reponses/a-quoi-correspond-une-tonne-de-co2/2141/>
- SMIT Salvage (s.d.) (réalisateur) *Raising the Kursk*, s.d., 31min
URL : <https://www.youtube.com/watch?v=uQJ6IMREvz8>
- Stanislav, V., Christina, G., & Vassil, S. (2015). Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: An overview. *Fuel*, 158, 330-350. DOI : 10.1016/j.fuel.2015.05.050
- Tetcher, I. (2018). *La radioactivité du corps humaine : Effet des actes médicaux et gestion des dépouilles radioactives*. Hal-01740687. Consulté en ligne le 15 juillet 2020
URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01740687/document>
- Thuy, C., Ramirez, J., Rainey, T., Ristovski, Z. & Brown,R.J. (2019). OMI. *Global impact of recent IMO regulation on marine fuel oil refining processes and ship emissions*. Transportation Research Part D, 1-12. DOI: 10.1016/j.trd.2019.04.001

Tissot, B. (2003). Source d'énergie primaire et effet de serre. *Geoscience*, 335, issues 6-7, 597-601. DOI : 10.1016/S1631-0713(03)00104-4

Vasilis, M. & Hyung, C.K. (2007). Greenhouse-gas emissions from solar electric- and nuclear power: A life-cycle study. *Energy Policy*, 35, 2549-2557.
DOI:10.1016/j.enpol.2006.06.022

Wagner, H.J. (1978). The energy cost of building and operating selected energy supply system technologies. *Angewandte Systemanalyse* Nr. 10, Jül-1561. Jülich, Germany: Kernforschungsanlage Jülich GmbH. ISSN 0343-7639

WISE Uranium Project. (2007). Uranium Enrichment Tails Upgrading (Re-enrichement). Consulté le 13 Aout 2020 URL : <https://www.wise-uranium.org/edumu.html>

Weis, M., Kienle, F. & Hortmann, W. (1990). Atomic energy and CO2: energy expense and CO2-emissions in fuel extraction. *Elektrizitätswirtschaft*, 89 (1 et 2), 28-31.

World Nuclear Association. (2006). *Uranium enrichment*. Information paper 28. Consulté le 11 Aout 2020 URL: <http://www.world-nuclear.org/info/inf28.htm>

Annexe

Annexe A : Réglementation MARPOL

MARPOL est la convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires. Cette convention comporte plusieurs annexes dépendant du type de pollution pouvant être engendrée (OMI, 2020) :

- Annexe I : Prévention de la pollution par les hydrocarbures
- Annexe II : Prévention de la pollution par des substances liquide nocives transportées en vrac
- Annexe III : Prévention de la pollution par les substances nuisibles transportées en colis par la mer
- Annexe IV : Prévention de la pollution par les eaux usées des navires
- Annexe V : Prévention de la pollution par les ordures des navires
- Annexe VI : Prévention de la pollution de l'atmosphère par les navires

Comme nous pouvons le constater, les sources de pollutions pouvant venir des navires sont nombreuse mais également bien réglementée. Toutefois, le sujet nous concernant le plus étant la pollution de l'atmosphère, c'est sur l'annexe VI que nous allons porter notre attention. Elle a été adoptée pour la première fois en 1997, révisée en 2005 et entrée en vigueur en 2010. L'annexe VI s'applique à tous les navires sauf pour quelques exceptions comme : (OMI, 2020) :

- Toutes émissions de gaz afin d'assurer la sécurité du navire.
- Toutes émissions de gaz due à un défaut de l'équipement du navire.
- Les navires de recherches concernant la réduction des émissions
- Les émissions liées à l'exploitation des fonds marins.

Certification

Voici ci-dessous la liste des émissions qui sont contrôlées par l'annexe MARPOL VI, chacun de ces points à des réglementation qui lui son propre (OMI, 2020)

- Ozone et gaz à effet de serre
- Oxyde d'azote (NOX)
- Oxyde soufre (SOX) et particules fines

- Composant organique volatile (VOC)
- Emission due à l'utilisation de l'incinérateur

Une première distinction est faite entre les navires de plus et moins de 400 tonneaux de jauge brut⁷. Les navires ayant moins de 400 GRT sont réglementé différemment. La majorité des navires étant supérieur à cette valeur, c'est sur ceux-ci que l'importance sera mise.

Les navires sont contrôlés aux moyens d'inspection menée par les sociétés de classification, des certificats, les autorités portuaires ainsi que des méthodes de détections de violation de la convention. Les inspections sont menées de manières très rigoureuses selon le schéma suivant (OMI,2020):

- Inspection Initial : Avant la mise en service du navire
- Inspection de renouvellement : Délais indiqué par l'administration mais n'excède jamais cinq ans.
- Inspection annuelle : Délais de trois mois avant et après la date d'anniversaire du certificat
- Inspection additionnelle : En cas de réparation importante ou toutes autres opérations ayant modifié la structure du navire.

Durant les inspections, ce sont les défauts éclairés par les inspections précédente qui seront vérifiés ainsi que les certificats de base (OMI,2020):

- **Le EEDI** (Energy efficiency design index) : Cet index est déterminé avant même l'inspection initial du navire. C'est un index d'efficacité énergétique d'un navire basé sur son âge, son tonnage et également sur ses émissions de CO₂ en tonne-mile. Toutefois dépendant du type de propulsion (pe : diesel-électrique, turbine, etc). Le calcul de l'index nécessite des facteurs de correction.

⁷ Tonneaux de jauge brut : Unité servant à quantifier la capacité de cargaison d'un navire
1 Tonneau de jauge brut (GRT) = 2,83 m³

- **Require EEDI** : Dépendant donc de l'âge du navire, du type (vraquier, pétrolier, etc) et de son tonnage brut, un index minimum sera requis.
- **Le IEE** (International Energy efficiency certificate) : Si le calcul de l'EEDI du navire est conforme au EEDI requis, le navire reçoit le certificat IEE, vérifié sur base d'inspection annuelle.
- **Le SEEMP** (Ship energy efficiency management plan) : Ce sont les procédures produites par l'OMI pour les marins afin de mesurer et de contrôler les émissions de CO₂ et autres substances dangereuses. Ces données sont utilisées pour l'établissement de l'EEDI.

Si le navire répond aux critères de l'inspection, celui-ci se verra délivrer le « International Air Pollution Prevention Certificate -IAPP ». Ce certificat atteste que le navire est conforme aux normes de contrôle de la pollution de l'air. Il est issu lors de l'inspection initiale du navire et contrôlé lors des inspections annuelles. De plus, la validité du certificat peut s'étendre à plus de cinq ans et doit être renouvelé aux termes de celui-ci. Toutes ces certifications permettent d'assurer que les navires marchands sont conformes aux normes environnementales en vigueur à l'heure actuelle concernant les émissions. Toutefois ces normes sont sujettes à une évolution constante (OMI,2020)

Emissions contrôlées par MARPOL VI

Toutes les émissions suivantes sont contrôlées durant les inspections du navire en vue de l'obtention du certificat IAPP. L'objectif de ce récapitulatif est de pouvoir ensuite le comparer de la même manière aux émissions liées à la propulsion nucléaire

A) Substance appauvrissant la couche d'ozone

Dans cette partie de l'annexe VI, il y est question des gaz ayant un effet néfaste sur la couche d'ozone. Elle s'applique pour toutes parties du navire non scellée⁸ pouvant contenir de tels gaz. Pour les navires construits après le 19 Mai 2005, il est interdit d'utiliser des substances à effet néfaste sur la couche d'ozone autre que le hydro-fluorocarbon. Pour ceux construits après le 01^{er} janvier 2020, les installations contenant du hydro-fluorocarbon sont

⁸ Non scellée : S'applique aux systèmes du navire nécessitant des recharges de gaz ou une possible fuite est possible.

interdites. Tous navires devant subir des recharges de gaz à effet néfaste sur l'atmosphère, doit tenir un journal de bord pour ces gaz (Ozone Depleting Substances Record Book).

B) Oxyde d'azote (NO_x)

MARPOL VI introduit également des restrictions concernant l'émission d'oxyde d'azote (NO_x), les prescriptions sont valables pour les moteurs de puissance supérieur à 130 kilowatts excepté les moteurs utilisés en cas d'urgence.

La réglementation est indépendante du tonnage du navire sur lequel le moteur est installé.

Le moteur d'un navire est classé en trois catégories « tiers » de contrôle d'émission appliqué aux dépendant de la date de construction du navire et du régime moteur nominal, indiqué dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable. Erreur ! Source du renvoi introuvable.** (OMI, 2020)

Tableau 17 Classement des navires en fonction des émissions de NO_x et année de construction
Source : Oxyde d'azote – règle 13, OMI (2020)

Niveau	Date de construction du navire ou après	Limite d'émission totale pondérée par cycle (g/kWh) n = régime nominal du moteur (tr/min)		
		n < 130	n = 130 - 1999	n ≥ 2000
I	1er janvier 2000	17,0	$45 \cdot n^{(-0.2)}$ par ex., 720 tr/min – 12,1	9,8
II	1er janvier 2011	14,4	$44 \cdot n^{(-0.23)}$ par ex., 720 tr/min – 9,7	7,7
III	1er janvier 2016*	3,4	$9 \cdot n^{(-0.2)}$ par ex., 720 tr/min – 2,4	2,0

Ce tableau indique le nombre de g/kWh de NO_x qu'un navire peut émettre en fonction du régime du moteur (n) exprimé en tour par minute. Ces caractéristiques sont contrôlées lors du voyage d'essais du navire en vue de l'obtention du certificat IAPP.

L'obligation d'avoir un moteur de tier III est applicable aux navires construits après le 01 janvier 2016 ou aux navires naviguant dans les zones de contrôles des émissions, appelée zone ECA (Figure 41).

Un moteur de tier II sera accepté à l'extérieur de ces zones ou pour un navire construit avant 2016. Les moteurs installés sur les navires construits le 1^{er} janvier 1990 ou après, mais avant le 1^{er} janvier 2000 doivent respecter le tier I sauf si une autre méthode est approuvée par l'administration (OMI,2020).

C) Oxyde de soufre (SO_x) et particules fines

Pas plus tard que le 01 janvier 2020, un nouveau cap a été franchi par la marine marchande en ce qui concerne les émissions de SO_x (voir 5.1.2 Emission de substance acidifiante)). Le cap franchit visait à réduire l'émission de ces substances en réduisant la quantité de soufre pouvant être contenue dans les gaz d'échappement. Cette concentration est passée de 3,5 % à 0,5% m/m de soufre dans le fioul. Selon l'OMI, cela a pour but de diminuer les émissions de SO_x de la marine marchande à hauteur de 77% pour une quantité d'environ 8,5 millions de tonnes annuellement.

Il existe différents moyens pour les navires afin de satisfaire ces exigences (OMI,2020):

- Utiliser un fioul de meilleure qualité, contenant une quantité inférieure de soufre inférieures ou égale à 0,5% m/m
- Utiliser du LNG comme fioul
- Utiliser de l'énergie venant de la Terre quand le navire est au port.
- Utiliser un « Scrubber »

Cette dernière technique est très importante, surtout pour les navires de grandes tailles car l'installation du « scrubber » requiert beaucoup de place. Un scrubber permet à un navire de continuer à utiliser un fioul supérieur à 3,5 % de soufre si les émissions de SO_x sont inférieures aux normes en vigueur. Le principe de manière basique, est de nettoyer les gaz d'échappement dans une « douche » afin de nettoyer les gaz d'échappement (OMI,2020).

Un schéma basique du fonctionnement d'un scrubber (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) nous montre par quels réactions chimiques les gaz peuvent être nettoyés.

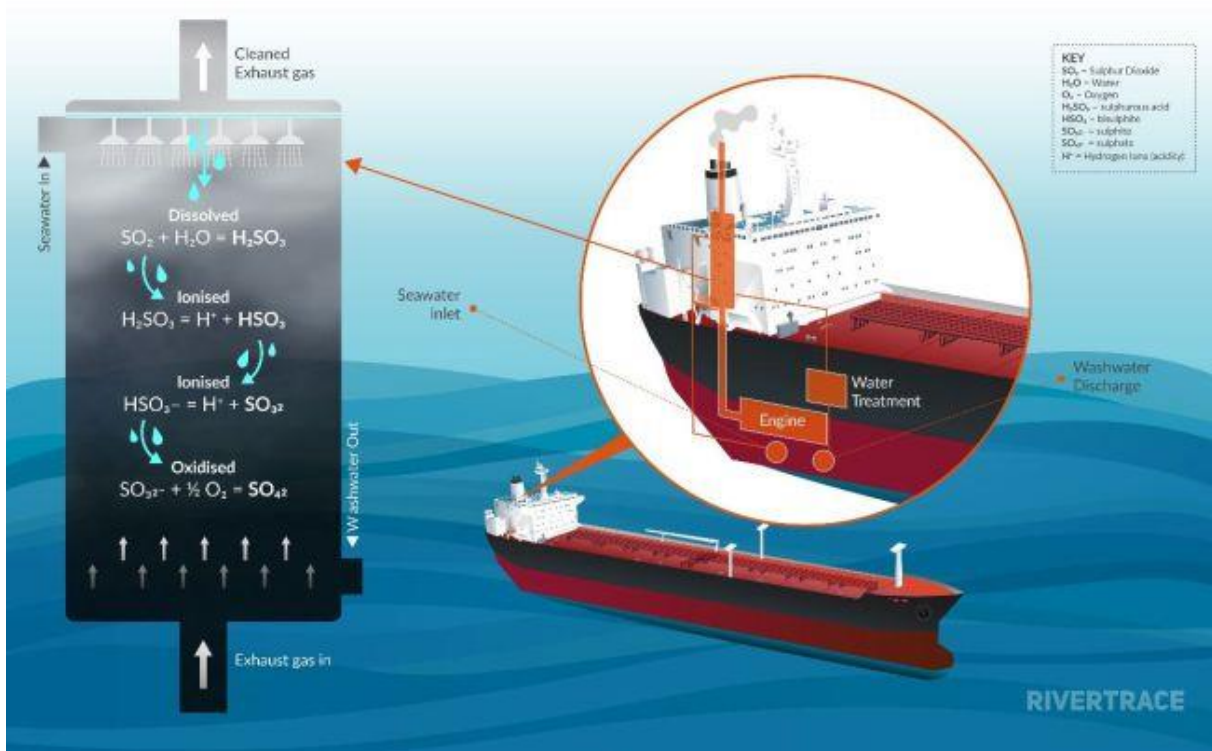


Figure 40 Schéma de fonctionnement d'un scrubber
Source : MI News Network – Shipping news (2020, Janvier 16)

Toutefois, l'utilisation d'un scrubber produit une substance acide qui peut être rejetée à la mer dans le cas d'un système ouvert ou reconditionnée dans le cas d'un système fermé. Dans le premier cas, l'eau peut être rejetée à condition que certains facteurs soit contrôlé (pH, PAH (métaux), turbidité et température). Dans l'autre cas, l'eau est traitée et reconditionnée avant d'être réutilisée. Les résidus du nettoyage des gaz d'échappement pouvant être hautement toxique, doivent être débarqué à terre.

En plus des exigences concernant les émissions de SO_x qui doivent être inférieure à 0,5% partout dans le monde, certaine zone bénéficie de réglementation plus stricte encore. Ces zones se nomme « Zone ECA – Emission Control Aera ». Dans ces zones, les émissions

des gaz d'échappement de soufre son limité à 0,1% ainsi que des mesures concernant les autres émissions. La carte ci-dessous représente les zones ECA actuelle (OMI,2020).

- Mer Baltique : SO_x
- Mer du Nord : SO_x
- Amérique du Nord : SO_x, NO_x et particules fines
- Caraïbes et Etats-Unis : SO_x, NO_x et particules fines

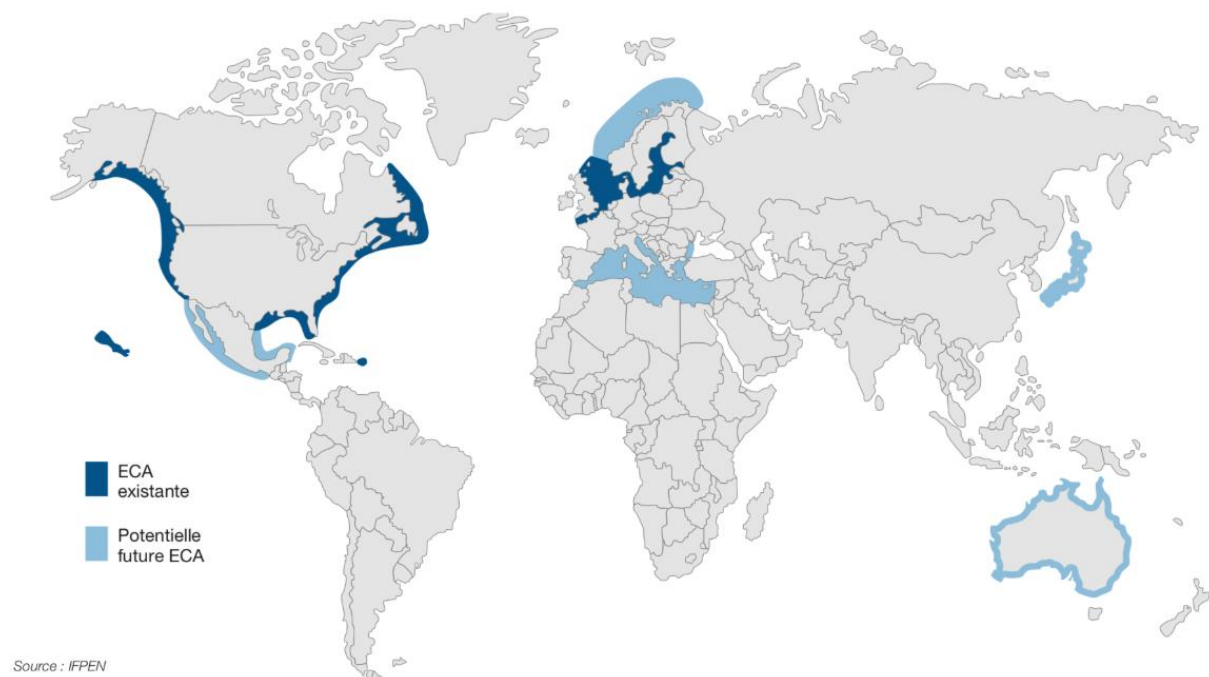


Figure 41 Cartes des zones ECA
Source : IFPEN (2020, Mai 03)

D) Composés organique volatiles (VOC)

Marpol VI – regulation 15

E) Emission de l'incinérateur

Marpol VI – regulation 16

Annexe B : Schéma cycle de vie écologique

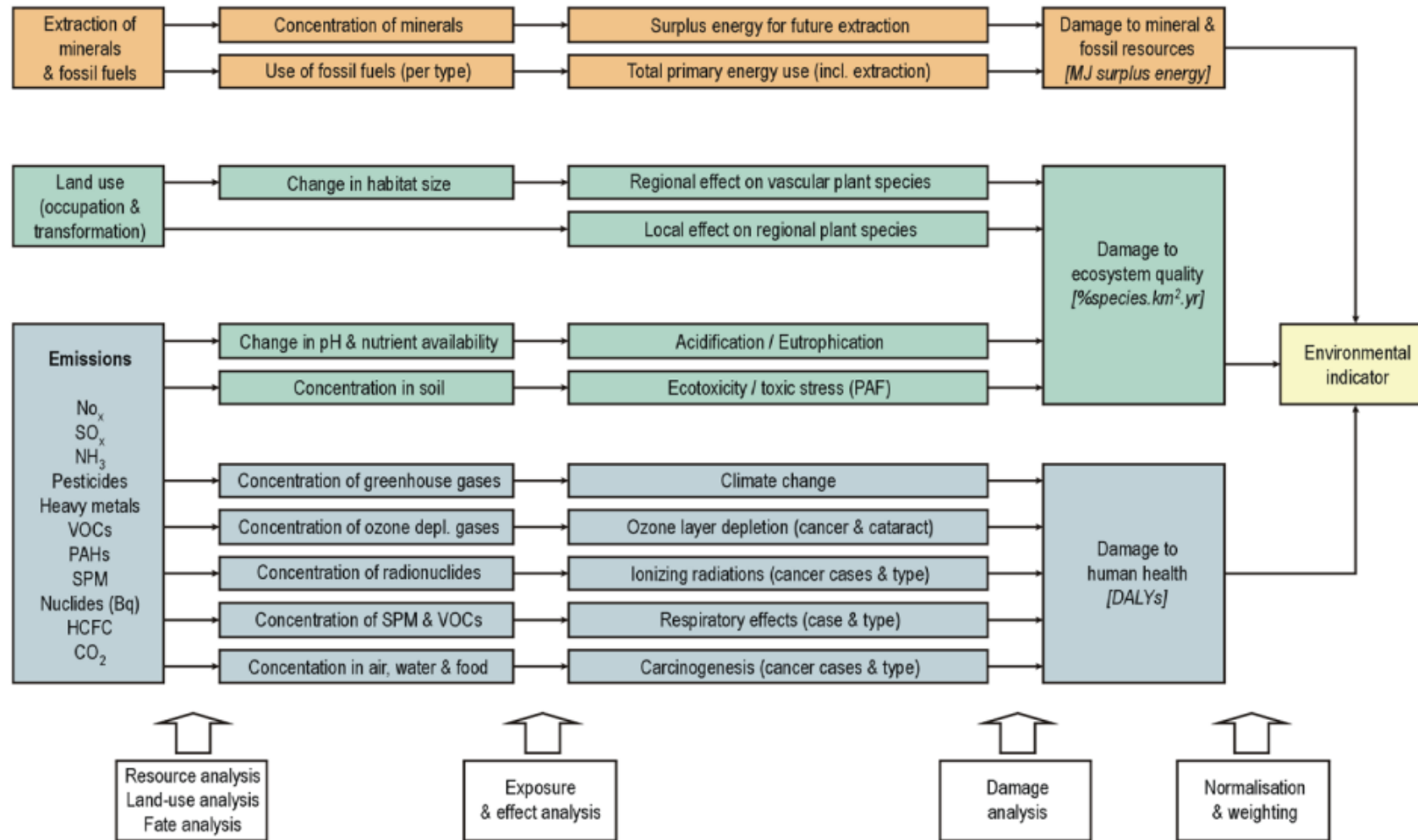


Figure 42 Schéma de principe de la méthode ACV EcoIndicator 99

Source : Etude comparative de carburants par analyse de leur cycle de vie (Gnansounou & Dauriat, 2004)

Annexe C : Deux méthodes de lessivage de l'uranium

