



Paris, le 9 septembre 2021

AVIS DE LA SFEN

Impact de la production d'énergie nucléaire sur la biodiversité

A l'occasion du Congrès mondial de la nature de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN), du 3 au 11 septembre 2021 à Marseille.

La Société française d'énergie nucléaire (Sfen) est une association scientifique et technique à but non lucratif, qui rassemble 4 000 professionnels, ingénieurs, techniciens, chimistes, médecins, professeurs, et étudiants, des sites industriels et des organismes de recherche nucléaire français. Sa mission est le développement des connaissances de toutes celles et ceux qui s'intéressent à l'énergie nucléaire.

Introduction :

Publié en 2019, le rapport de l'IPBES¹, synthèse scientifique sur l'état de la biodiversité dans le monde, estimait qu'environ 1 million d'espèces animales et végétales – soit une sur huit – risque de disparaître au cours des prochaines décennies.

Le Comité français de l'UICN mène des actions pour répondre aux enjeux de la **préservation de la biodiversité en France et dans le monde**. Ces actions s'articulent autour de 5 axes : Terres, Eau, Océans, Climat et Humanité. L'objectif de la COP15 sur la biodiversité, qui se déroulera en Chine en avril 2022, sera de parvenir à un accord sur un objectif de **30 % des espaces terrestres et marins à protéger d'ici 2030**, avalisé lors de la 4^{ème} édition du « One Planet Summit » tenue à l'Élysée le 11 janvier 2021.

Alors que des débats sont en cours sur le choix du futur mix électrique à l'horizon 2050, ce travail de la Sfen vise à fournir, autour des axes **Terres (destruction des habitats)** et **Eau-Océans (ressource en eau et pollution² d'origine thermique, radioactive ou chimique)³**, des données sur les impacts, négatives et positives, directes et indirectes, de la filière nucléaire sur les écosystèmes. La Sfen espère ouvrir ainsi la voie à des initiatives de synthèse similaires pour les autres filières énergétiques, suivant une même approche conservatrice et à périmètres équivalents. Ce travail permettra de fournir aux

¹ Intergovernmental science policy platform for biodiversity and ecosystem services

² Pollution dans le sens très précis d'altération des propriétés physico-chimiques d'un écosystème.

³ Pour une dernière synthèse de la Sfen sur nucléaire et climat : <https://new.sfen.org/wp-content/uploads/2021/02/Position-2021-Nuclear-for-climate-avril-2021-Francais.pdf>

décideurs les outils dont ils ont besoin pour définir une politique énergétique préservatrice de la biodiversité.

La Sfen s'est appuyée sur les compétences de sa section technique 8 « Économie et stratégie énergétique », sur une revue de littérature, avec des données France et Monde, utilisant des approches méthodologiques variées, ainsi que sur les données des centrales nucléaires d'EDF⁴. Ce premier résumé est préalable à la publication d'une note technique qui approfondira les éléments présentés.

Résumé :

- Bien que largement contingents aux méthodologies, les résultats des analyses de cycle de vie (ACV) présentés dans cette étude montrent que, par unité d'énergie produite, la filière nucléaire a une empreinte au sol plus faible en moyenne que les énergies renouvelables. Son empreinte est comparable à celle des centrales fossiles : il reste néanmoins plus avantageux quand on intègre les impacts des émissions de CO2 et du changement climatique sur la biodiversité. La construction de nouveaux réacteurs nucléaires, destinés à renouveler en partie le parc actuel, ne nécessiterait pas l'artificialisation de nouveaux sites. Le foncier non occupé et interdit au public autour des sites nucléaires représente une opportunité de contribuer à l'augmentation de la surface des espaces protégés.
- Pour les indicateurs d'émissions de particules, d'eutrophisation et d'acidification, particulièrement importants pour la biodiversité, l'énergie nucléaire présente d'excellents scores, au contraire des énergies fossiles, fortement émettrices de particules et de polluants atmosphériques ; l'eau est un enjeu pour lequel la filière nucléaire est soumise à une réglementation et un contrôle strict. Les installations disposent de leviers techniques pour réduire d'avantage les impacts sur les écosystèmes marins et d'eau douce. Les rejets chimiques et radioactifs ne sont aujourd'hui pas une menace pour la biodiversité et restent largement en dessous des seuils fixés par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN).

Rappel :

La biodiversité est définie dans l'article 2 de la Convention sur la diversité biologique, adopté lors du sommet de la Terre à Rio de Janeiro, comme la « *variabilité des organismes vivants de toute origine y compris, entre autres, les écosystèmes terrestres, marins et autres écosystèmes aquatiques et les complexes écologiques dont ils font partie* ».

Si la biodiversité constitue une richesse en soi, que chacun peut défendre pour des raisons esthétiques ou morales difficilement quantifiables, les services écosystémiques et le capital naturel qui engendrent cette profusion de formes de vies sont aussi **essentiels au fonctionnement de notre planète**. A ce titre, ils constituent des éléments décisifs pour le bien-être, le développement et la survie des sociétés humaines et font donc partie intégrante de la vie économique⁵.

⁴ Les documents sont publics.

⁵ Costanza et al., The value of the world's ecosystem services and natural capital (1998).

1. Terres : le maintien du socle de production nucléaire ne nécessite quasiment aucune nouvelle artificialisation des sols

En France la part relative des infrastructures du système électrique est faible : de l'ordre de 1% du territoire⁶.

La loi Climat et Résilience définit l'**artificialisation des sols** de la façon suivante : « *Un sol est regardé comme artificialisé si l'occupation ou l'usage qui en est fait affecte durablement tout ou partie de ses fonctions écologiques, en particulier ses fonctions biologiques, hydriques et climatiques, ainsi que son potentiel agronomique* ». Il est à noter que la littérature utilise en général plutôt les notions d'usage des sols (la fonction qui en est faite comme, par exemple, l'agriculture) ou celle d'occupation des sols (la couverture biophysique des surfaces).

1.1. Empreinte au sol de la production d'énergie nucléaire

La Sfen a fait le choix de se focaliser sur la notion d'**empreinte au sol** définie comme la surface nécessaire à la production d'une unité d'énergie en ACV [$m^2/GWhé/an$]. Par définition, plus un moyen de production présente une densité énergétique élevée (en $GWhé/an/m^2$), moins son empreinte au sol sera importante.

Le nucléaire est une énergie extrêmement dense : dans le périmètre du parc nucléaire français utilisant la technologie à eau légère, la densité d'énergie produite dans une cuve de réacteur est de l'ordre de 100 MW thermique par m^3 . La densité énergétique de l'îlot nucléaire, la partie de la centrale nucléaire qui abrite le circuit primaire, est de l'ordre de 260 $MWhé/an/m^2$.

- Empreinte au sol des centrales nucléaires

On peut estimer l'empreinte au sol des centrales nucléaires, à partir des données publiées sur les sites des centrales nucléaires.

Un relevé de données sur quelques exemples de centrales donne des résultats d'emprise au sol très variables selon les sites. On observe qu'aux Etats-Unis, les industriels disposent en général de davantage de place qu'en Europe, et les installations ont des empreintes au sol plus grandes.

Source : sites des centrales (EDF, TVA, FPL)

	France			Etats-Unis	
	Tricastin	Gravelines	Penly	Watts Bar	Turkey Point
Superficie du site (ha)	55	150	230	720	1300
Puissance sur site (GW)	3,6	5,4	2,66	2,3	1,7
Empreinte au sol ($m^2/GWhé$)	27	46	138	716	1158

⁶ RTE GT Environnement.

En France, l'étude⁷ qui fait référence fournit une empreinte moyenne du foncier pour les centrales nucléaires de 45 m²/GWh/an.

L'emprise du domaine foncier acquis pour chaque installation varie, en fonction de l'histoire du site, du coût du terrain, et aussi de la place réservée à d'autres installations potentielles, par exemple pour la construction de nouveaux réacteurs nucléaires. Dans la plupart des cas, les surfaces clôturées sont largement surdimensionnées par rapport aux surfaces effectivement occupées par le bâti. Ainsi une partie du foncier peut être utilisée potentiellement à d'autres fins, naturelles ou agricoles.

Ceci présente un double intérêt :

- Un programme de « nouveau nucléaire », dont l'objectif serait de renouveler une partie du parc existant par **la construction de nouveaux réacteurs ne nécessiterait pas l'artificialisation de nouveaux sites**. Ainsi EDF a indiqué être en mesure de construire les 6 premiers EPR sur des sites existants : Penly (Normandie), Gravelines (Hauts de France), et Bugey ou Tricastin (AURA).
- Le foncier non occupé autour de sites nucléaires, interdits d'accès au public, représente une opportunité de **contribuer à l'augmentation de la part des espaces protégés et de créer des zones de biodiversité positive** : en témoignent les actions de la centrale de Saint-Alban en partenariat avec le Conservatoire des espaces naturels ou la réserve ornithologique du Blayais.

- Emprise au sol liée au combustible : Analyse du Cycle de Vie (ACV)

Les ordres de grandeur sont pour les emprises de l'extraction et traitement du minerai et de l'enrichissement du combustible. Les écarts pour l'activité minière dépendent des concentrations de minerai, exploitées en souterrain ou à ciel ouvert. L'écart sur l'enrichissement résulte du choix entre diffusion gazeuse et centrifugation. L'étude Smil utilise beaucoup de données américaines. Sur l'emprise au sol des centrales, comme vu plus haut, la France présente des chiffres plus bas. Un travail additionnel en cours est nécessaire pour évaluer de manière homogène les chiffres pour la France.

sites associés au nucléaire	variante basse	variante haute
centrale	1,14 m ²	0,06 m ²
extraction du minerais (U)	0,05 m ²	0,00 m ²
enrichissement de l'uranium	0,35 m ²	0,00 m ²
entrepôts combustible usé	0,01 m ²	0,01 m ²
total (m ² /(MWhé/an)	1,56 m ²	0,07 m ²
total (kWhé/an/m ²)	643 kWhé	14 370 kWhé

source: (Smil, 2015) box 5.5 & 5.6

⁷ Poinssot et al., Assessment of the environmental footprint of nuclear energy systems. Comparison between closed and open fuel cycles (2014).

En complément de ces évaluations, de plus en plus de travaux⁸ se développent actuellement pour évaluer les empreintes matières liées à la construction des installations elles-mêmes (matériaux de structure). Qui dit empreintes matières dit calculs aussi d'empreintes au sol liées à la production de ces matières⁹ ; un exemple : les mines de cuivre.

1.2. Comparaison avec les autres énergies

Il paraît difficile de fournir une comparaison à périmètre égal de l'artificialisation induite par le développement de différentes filières de production électrique : les topologies des infrastructures sont différentes, ainsi que leur raccordement au réseau.

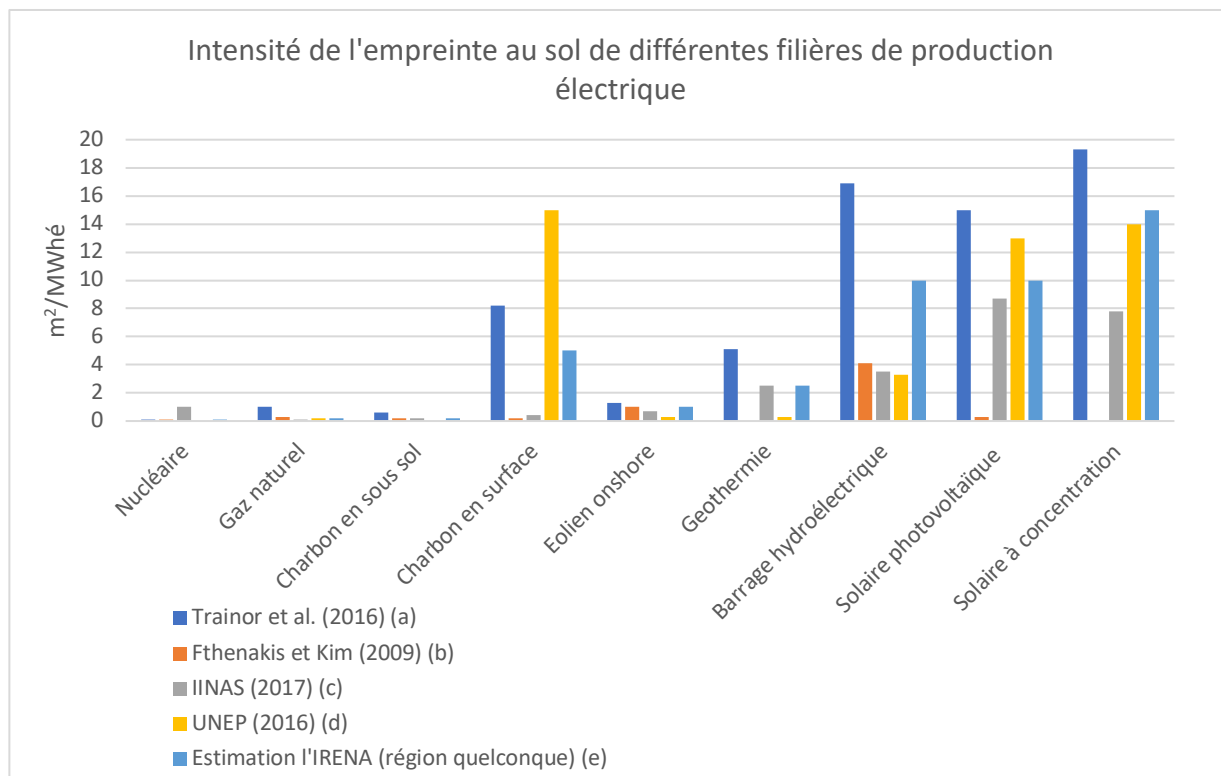
Que ce soit pour le nucléaire, le solaire, ou l'éolien, l'empreinte au sol ne préjuge pas de l'usage d'une partie du sol autour des installations à d'autres fins, notamment naturelles ou agricoles. C'est aussi vrai pour l'hydro-électricité : son empreinte élevée résulte des lacs, utilisables également à des fins piscicoles ou de sports d'eau.

Pour comparer les ordres de grandeur d'empreinte au sol du nucléaire par rapport à d'autres sources de production, la Sfen a utilisé des chiffres de l'IRENA – Agence internationale pour les énergies renouvelables - sur l'empreinte au sol de différentes filières de production, suivant différentes méta-analyses. La grande variabilité des résultats sur le nucléaire, le charbon, le solaire PV souligne encore une fois la dépendance des résultats aux périmètres et aux hypothèses utilisés.

Product	Primary energy source	Land use intensity [m ² /MWh]					
		U.S. data ^{a)}	U.S. data ^{b)}	EU data ^{c)}	UNEP ^{d)}	Typical ^{e)}	
Electricity	Nuclear	0.1	0.1	1.0		0.1	
	Natural gas	1.0	0.3	0.1	0.2	0.2	
	Coal	Underground	0.6	0.2	0.2		0.2
		Surface ("open-cast")	8.2	0.2	0.4	15.0	5.0
	Renewables	Wind	1.3	1.0	0.7	0.3	1.0
		Geothermal	5.1		2.5	0.3	2.5
		Hydropower (large dams)	16.9	4.1	3.5	3.3	10
		Solar photovoltaic	15.0	0.3	8.7	13.0	10
		Solar – concentrated solar power	19.3		7.8	14.0	15
		Biomass (from crops)	810	13	450		500
Liquid Fuel	Fossil oil	0.6		0.1		0.4	
	Biofuels	Corn (maize)	237		220		230
		Sugarcane (from juice)	274		239		250
		Sugarcane (residue)					0.1
	Soybean	296		479		400	
	Cellulose, short rotation coppice	565		410		500	
	Cellulose, residue			0.10		0.1	

⁸ Irena 2019, JRC 2020, Watari et al. 2019, Vidal 2019, WNA 2020.

⁹ On pourra se référer aux articles de la RGN Juillet-Août 2021 consacrée à l'empreinte matières non énergétiques.



Ces chiffres montrent que, en ACV :

- Le nucléaire présente un bilan comparable voire dans certains cas avantageux par rapport aux renouvelables, son principal atout étant sa densité énergétique élevée.
- L'empreinte au sol des centrales à gaz est du même ordre de grandeur que celles du nucléaire, et bien plus faible pour le charbon si ce dernier est extrait en surface.

Néanmoins, soulignons que :

- Pour le solaire et l'éolien, les effets additionnels liés à l'empreinte des matières nécessaires à la construction des installations, qui donnent un avantage additionnel au nucléaire¹⁰ (étude AIE) : une pénétration accrue des EnR dans les systèmes électriques s'accompagnera d'un besoin supplémentaire en batterie ; sous la pression de la demande, une réglementation environnementale forte devra être adoptée au niveau international sur les chaînes d'approvisionnement du cuivre notamment.
- Pour le gaz et le charbon, les effets néfastes liés aux émissions de CO₂ et leurs effets indirects sur la biodiversité terrestre : les feux de brousse causés par la sécheresse et les températures élevées ou la propagation des parasites lors des hivers doux en sont des exemples.

¹⁰ AIE, The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions.

2. Eau-Océans : une réglementation exigeante et un système de contrôle rigoureux

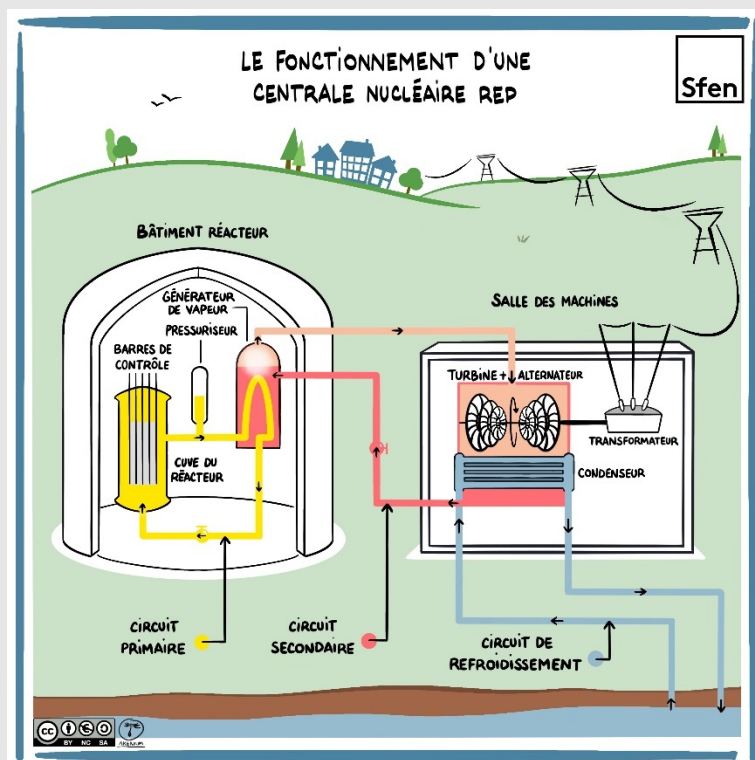
Pour fonctionner une centrale thermique nécessite généralement une source d'eau froide : sur l'ensemble du cycle de vie d'une centrale nucléaire, 99 % de l'eau utilisée l'est lors de la phase d'exploitation. Les impacts afférents sur les écosystèmes marins et d'eau douce et la gestion de la ressource sont encadrés par des directives européennes et déclinés dans une réglementation nationale.

En France les autorisations de prélèvement d'eau et de rejets, sujettes à des contrôles stricts, sont accordées par l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) en accord avec le Code de l'environnement. Elles font l'objet d'une étude d'expertise propre à chaque centrale suivant les paramètres écologiques du milieu, le bassin d'implantation, la qualité de l'eau, le débit, le mode de refroidissement.

Chaque impact environnemental négatif, réglementé et contrôlé, que crée la centrale sur son environnement – prélèvement et consommation d'eau puis rejets thermiques, chimiques, radioactifs – est traité économiquement au moyen de redevances versées à l'agence de l'eau local.

Rappel sur les prélèvements et la consommation d'eau des centrales nucléaires.

Une centrale thermique est une centrale électrique dans laquelle le générateur est actionné par de la vapeur d'eau. La source chaude constituée par l'eau du circuit primaire chauffée par le combustible transmet son énergie thermique au circuit secondaire, générateur de vapeur. L'eau ainsi vaporisée entraîne un groupe turbo-alternateur puis s'échappe de celui-ci vers le



condenseur où elle y est refroidie et condensée. Le circuit assurant le refroidissement (circuit tertiaire) constitue la source froide dont la température varie entre 0°C et 30°C. La source froide permet de dissiper la chaleur du condenseur.

Par conception, le circuit de refroidissement, **qui n'est jamais en contact direct avec le réacteur**, peut¹¹ :

- i. Fonctionner en **circuit ouvert**. L'eau est prélevée par pompage généralement depuis un cours d'eau au débit suffisant, un lac, ou depuis la mer et refroidit directement le condenseur. L'eau est alors entièrement restituée au cours d'eau au plus près du point de prélèvement et immédiatement disponible pour les autres usages.
- ii. Fonctionner en **circuit fermé**. L'eau est refroidie au moyen d'une tour aéroréfrigérante. Les prélèvements d'eau sont plus faibles, et permettent l'installation de la centrale, proche d'un cours d'eau à faible débit. En revanche, une partie de l'eau du circuit est vaporisée dans l'atmosphère, dit autrement : consommée.

Il est important de garder cette distinction en tête. **A cet égard, l'anglais peut aider : « withdrawal » pour l'eau retirée puis restituée à la source froide, « consumption » pour l'eau consommée et rejetée dans l'atmosphère.** Suivant le mode de refroidissement, comme nous le verrons dans la suite, les enjeux ne sont pas les mêmes.

2.1. Prélèvement et consommation d'eau

Dans les écosystèmes fluviaux, la disponibilité de l'eau ainsi que les ruptures de connectivité écologique peuvent avoir un impact sur le long terme. En cycle ouvert, l'eau prélevée, de l'ordre de 40 m³/s/GWé, est entièrement restituée à la source froide. En cycle fermé, la centrale prélève peu d'eau (2 m³/s/GWé) mais une certaine quantité est consommée, c'est-à-dire vaporisée dans l'atmosphère : de l'ordre de 0,75 m³/s/GWé (source : EDF).

La disponibilité de l'eau peut constituer un enjeu pour les centrales au bord de rivières en cas de sécheresse : le débit du cours d'eau doit être suffisant pour garantir le fonctionnement des installations toute l'année. Pour certaines centrales, une coordination étroite avec les gestionnaires de barrages en amont est mise en place afin de minimiser ces périodes.

Pour les centrales en front de mer, la disponibilité en eau ne constitue pas un enjeu.

2.2. Qualité de l'eau

Pour leur fonctionnement, les centrales nucléaires doivent effectuer régulièrement des rejets radioactifs et chimiques, qui sont précisément encadrés et contrôlés. En moyenne, sur chaque installation, de l'ordre de 20 000 contrôles sur l'environnement des centrales sont réalisés chaque année : prélèvements en rivière, dans la nappe phréatique, dans l'herbe, le lait.

- Rejets radioactifs :

Des transferts contrôlés de radionucléides en milieu aquatique peuvent avoir lieu de la cuve du réacteur à l'environnement. Avant rejet, les effluents sont systématiquement retenus dans des réservoirs afin d'être contrôlés. Les rejets radioactifs ont un impact très faible, d'un

¹¹ D'autres modes de refroidissement existent mais marginalement à l'échelle du parc nucléaire en France ou dans le monde.

facteur 100 inférieur à la radioactivité naturelle (source : EDF). Tous les résultats sont accessibles au public sur le site RNM tenu par les pouvoirs publics www.mesure-radioactivite.fr.

- **Rejets chimiques :**

Les rejets chimiques, issus des substances utilisées en phase d'exploitation et de maintenance (par exemple : le traitement antitartre pour les centrales en circuit fermé) font l'objet d'une réglementation que les centrales sont tenues de respecter. Les contrôles permettent de s'assurer que les seuils ne soient pas dépassés. Les installations disposent de leviers techniques pour réduire d'avantage les impacts sur les écosystèmes marins et d'eau douce : par exemple, la rénovation récente des condenseurs¹² pour la centrale de Nogent a supprimé en quasi-totalité les rejets de cuivre et de zinc, bien en deçà des seuils réglementaires.

- **Rejets thermiques :**

L'impact est double sur les organismes aquatiques :

- Le premier impact, immédiat et direct, consiste en l'élévation de la température localement : les organismes vivants aquatiques -hors mammifère- sont tributaires de la température du milieu pour leur physiologie ;
- Le deuxième impact, indirect, se produit via la modification induite par l'élévation de température sur les paramètres physico-chimiques du milieu aquatique. Par exemple, lorsqu'il y fait plus chaud, la solubilité du dioxygène diminue : il s'y fait alors plus rare.

En mer les rejets thermiques subissent une forte dilution et n'est donc pas un sujet. Les réacteurs en cycle ouvert portent la très grande majorité des rejets thermiques des centrales dans les cours d'eau. Les limites réglementaires portent sur l'élévation de température de la source en aval de la centrale et sur la température absolue du cours d'eau après mélange. Sur la période 2008-2017, le tableau suivant fournit les valeurs moyennes, maximales et seuils, relatives à la centrale de Tricastin¹³.

CENTRALE DE TRICASTIN	VALEUR JOURNALIÈRE MOYENNE MESURÉE SUR LA PÉRIODE 2008-2017	VALEUR JOURNALIÈRE MAXIMALE MESURÉE SUR LA PÉRIODE 2008-2017	LIMITE AUTORISÉE SUR LA PÉRIODE 2008-2017 (EN CONDITIONS CLIMATIQUES NORMALES)
Échauffement amont – aval calculé (ΔT après mélange)	1,4 °C	5,5 °C	4°C-6 °C*
Température aval après mélange calculée	15,7 °C	27,8 °C	28 °C

* si $Q_{canal} < 480 \text{ m}^3/\text{s}$.

2.3. Impact direct sur les organismes

Les courants générés par le pompage de l'eau lors des prélèvements peuvent aspirer des organismes aux faibles capacités natatoires. Les plus petits organismes, de taille inférieure à la maille de filtration, sont entraînés dans les circuits de refroidissement où ils subissent

¹² Remplacement des tubes de condenseurs en laiton par des tubes en acier inoxydable.

¹³ Source : Rapport EDF « Centrales Nucléaires et Environnement, édition 2020 »

plusieurs chocs. Une partie est alors détruite. Différentes solutions technologiques de récupération des organismes aspirés sont utilisées pour les centrales en bord de rivières ou en estuaire. L'aspiration des organismes est un enjeu important pour les centrales en bord de mer (phénomène de banc de poissons) et, à ce titre, est surveillée de près par l'IFREMER. A date, aucune modification significative des écosystèmes marins ne peut être statistiquement reliée à l'activité des centrales françaises¹⁴.

¹⁴ Consulter par exemple les conclusions de l'étude de l'IFREMER dans le rapport environnemental 2020 de la CNPE de Gravelines.