



Master 2 Santé publique – Parcours METEORES

Promotion : **2022-2023**

Date du Jury : **Septembre 2023**

**Impacts des risques microbiologiques
liés au changement climatique sur les
activités d'EDF**

Sulyvan MAUPLOT

1 REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je souhaite remercier le Docteur Pierre-André Cabanes, Directeur du Service des Etudes Médicales, et l'ensemble de l'équipe pour m'avoir accueilli au sein de leur équipe durant ce stage.

Ensuite, je remercie mon maître de stage, le Docteur France Wallet, responsable des risques microbiologiques, pour m'avoir accompagné durant ces 6 mois, d'avoir pris de son temps pour corriger mon mémoire, et de sa patience.

Enfin, je remercie mon référent pédagogique, Pierre LeCann, pour avoir également suivi mon stage et m'avoir aidé à la réalisation de mon mémoire.

2 TABLE DES MATIERES

1	Remerciements	1
3	Liste des sigles utilisés.....	4
4	Résumé	5
5	Introduction	6
5.1	L'entreprise	6
5.2	Contexte.....	6
5.2.1	Changement climatique.....	6
5.2.2	Risques microbiologiques.....	8
5.3	Problématique liée à EDF	10
6	Méthodologie	13
6.1	Recherche bibliographique	13
6.2	Evaluation des risques.....	13
7	Principaux risques microbiologiques en lien avec le changement climatique.....	14
7.1	Maladies vectorielles.....	14
7.1.1	Moustiques.....	15
7.1.2	Mouches noires et onchocercose	18
7.1.3	Punaises et Maladie de Chagas.....	19
7.1.4	Poux et tiques.....	19
7.2	Maladies transmises par contact avec des milieux contaminés.....	20
7.2.1	Trématodes du genre <i>Schistosoma</i>	20
7.2.2	<i>Campylobacter spp.</i>	21
7.2.3	Légionelles.....	22
7.2.4	Salmonelles	22
7.2.5	Cryptosporidiose.....	23
7.2.6	Leptospirose	23
7.2.7	<i>Vibrio</i>	24
7.3	Incertitudes concernant les risques microbiologiques futurs	27
7.4	Risques en lien avec EDF et ses activités.....	28
8	Evaluation des risques	29
8.1	Caractérisation des dangers	30
8.1.1	Identification des dangers.....	30

8.1.2	Relation dose-réponse.....	35
8.2	Evaluation de l'exposition.....	37
8.2.1	Calcul de la concentration en pathogène de l'eau dans la zone de rejet	37
8.2.2	Exposition liée à la pratique d'une activité aquatique	43
8.2.3	Exposition liée à la consommation d'huîtres crûes	44
8.3	Caractérisation des risques.....	53
8.3.1	Risques d'infections lors de la pratique d'activités aquatiques	53
8.3.2	Risques d'infection lors de la consommation d'huîtres crûes.....	54
9	Discussion.....	55
10	Conclusion	57
11	Bibliographie.....	59
12	Annexes	66
12.1	Annexe A : Cartes des températures moyennes maximales françaises selon la période et le scénario RCP, obtenues à partir des outils de la Drias	66
12.2	Annexe B : Détail des calculs	69
12.2.1	Calcul du facteur multiplicatif de la relation concentration en Vibron en fonction de la température de l'eau du rapport de l'Ifremer.....	69
12.2.2	Calcul de la proportion de <i>V.parahaemolyticus</i> et <i>V.vulnificus</i> dans l'eau au point de rejet du site de Gravelines.....	69
12.2.3	Calcul des concentrations de <i>V.parahaemolyticus</i> et <i>V.vulnificus</i> dans l'eau au point de rejet en 2050 et en 2100.....	70
13	Résumé	71
14	Abstract	72
15	Résumé pour les décideurs	73

3 LISTE DES SIGLES UTILISES

AFCN : Agence Fédérale de Contrôle nucléaire

BfR : Institut fédéral allemand d'évaluation des risques

CDC : Centers for Disease Control

CDE : Connaissance des énergies

CNR : Centre National de Référence des Vibrions et de Choléra

ECDC : European Centre for Disease Prevention and Control

EDF : Electricité de France

EEA : Agence européen pour l'environnement

FDA : Food and Drug Administration

FAO : Food and Agriculture Organization

IRSN : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

RIVM : Rijkinstituut voor Volksgezondheid en Milieu

SPF : Santé Publique France

USEPA : U.S. Environmental Protection Agency

VNO : Virus du Nil Occidental

WHO : World Health Organization

4 RESUME

Environ la moitié des maladies infectieuses connues actuellement, sont ou seront impactées par le changement climatique. Les changements dans la fréquence, l'intensité et la durée des aléas climatiques vont favoriser la propagation et le développement de certains pathogènes. Ainsi, les maladies vectorielles et les maladies transmises par contact avec des milieux contaminés, verront leurs nombres de cas augmenter dans le monde du fait d'une modification de leurs aires de répartitions géographiques, d'un allongement de la période de contamination, de meilleures conditions de développement, etc. Cela pourrait avoir un impact sur EDF et ses activités en France et à l'international, tant pour ses travailleurs que pour l'impact de ses activités industrielles sur les riverains.

À la suite de ce constat, nous réalisons une évaluation des risques prospective et comparative sur deux espèces de Vibrions, *Vibrio parahaemolyticus* et *Vibrio vulnificus*. Le développement de ces espèces est favorisé lorsque la température de l'eau augmente. Ainsi, l'objectif est d'estimer l'impact du réchauffement des eaux, dû au changement climatique, dans la zone de rejet thermique de la centrale de Gravelines, sur les concentrations, ainsi que sur les risques d'infections de ces deux espèces, pour des populations pratiquant une activité aquatique ou consommant des huîtres crûes récoltées dans la zone d'influence thermique de la centrale. Les estimations sont faites à partir du scénario RCP 4.5, correspondant à un réchauffement faible, et du scénario RCP 8.5, correspondant au scénario de réchauffement le plus pessimiste, pour l'année 2050 et l'année 2100. Les résultats, de cette évaluation montrent que pour la pratique d'activité aquatique le risque est multiplié par 4 en 2100 pour les deux espèces, comparé à aujourd'hui, toutefois le risque reste très limité. Concernant le risque lié à la consommation d'huîtres crûes récoltées dans la zone d'influence thermique de la centrale, le risque est multiplié par 4 en 2100 pour le scénario RCP 4.5, et par 6 pour le scénario 8.5, mais contrairement à la pratique d'activités aquatiques, la consommation d'huîtres crûes présente un risque bien plus grand, de 2 à 3 ordres de grandeur supplémentaires.

5 INTRODUCTION

5.1 L'ENTREPRISE

Electricité de France ou EDF est une entreprise française de production et de fourniture d'électricité, créée le 8 avril 1946 à la sortie de la Seconde Guerre Mondiale (EDF). Cette électricité est produite à partir d'énergie nucléaire (76%), mais également hydraulique (8,2%), photovoltaïque et éolienne (5,7%), gaz et autres (10,1%) (EDF, 2022). Elle est implantée dans 23 pays et participe à différents projets, on peut citer par exemple le projet hydroélectrique « au fil de l'eau » au Cameroun et la construction du barrage hydro-électrique Sinop au Brésil (EDF, 2017). De ce fait, EDF doit faire face à un certain nombre de risques concernant la sécurité et la santé de ses travailleurs, mais aussi des populations riveraines des installations de production d'électricité. Parmi ces risques, on peut citer le risque chimique, le bruit, les rayonnements ionisants et non-ionisants, le risque lié à la pollution de l'air, ou encore le risque microbiologique, c'est ce dernier qui nous intéressera dans ce mémoire. Au sein de l'entreprise, j'ai intégré l'équipe du SEM (Service des Etudes Médicales), appartenant au pôle santé sécurité (PSS), qui s'occupe de traiter les questions de santé environnementale pour EDF, qu'elles soient de type physique, chimique ou microbiologiques, ainsi que du changement climatique, de la prospective et des sujets émergents.

5.2 CONTEXTE

5.2.1 Changement climatique

Aujourd'hui, il est bien établi que le climat change, du fait des activités humaines, qui depuis les années 1800 et les révolutions industrielles successives, ont entraîné la production toujours plus importante de gaz à effet de serre, *via* notamment l'utilisation de combustibles fossiles, tels que le charbon, le pétrole, ou encore le gaz. Il existe différents gaz à effet de serre, les plus importants étant dans l'ordre, la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane, le protoxyde d'azote, l'ozone, ainsi que les gaz fluorés qui sont les seuls à être exclusivement produits par l'Homme. Le réchauffement induit par ces gaz, entraîne une multitude de conséquences sur tous les milieux, mais également sur les organismes qui les

composent. Pour donner quelques exemples, l'augmentation des températures est à l'origine de la fonte des glaces un peu partout sur la planète et de la dilatation thermique de l'eau de mer (USEPA, 2022b), ceci contribue à l'augmentation du niveau des océans, avec une élévation aujourd'hui estimée entre 21 et 24 cm par rapport à 1880, dont 10 cm depuis 1993 (Lindsey, 2022). On observe également une contamination des réserves d'eau douce souterraines par l'eau salée des mers (Lindsey, 2022), un accroissement de la fréquence d'évènements météorologiques extrêmes, tels que les ouragans, les inondations, les sécheresses, etc. Une autre conséquence du réchauffement climatique est l'augmentation de la température des eaux. En effet, les océans stockent une partie de l'énergie contenue dans l'atmosphère sous forme de chaleur, permettant, entre autres, de limiter le réchauffement de l'atmosphère (USEPA, 2022a) ; mais cela a des conséquences sur les courants marins (USEPA, 2022c), l'acidité de l'eau (acidification principalement causée par l'augmentation de la concentration en CO₂ de l'eau) (USEPA, 2023b), l'habitat des espèces sous-marines (USEPA, 2023a), obligeant, par exemple, certaines espèces à vivre plus en profondeur ou à migrer vers des latitudes plus élevées afin de retrouver des températures plus froides. Ces changements impactent également la faune et la flore (USEPA, 2023a), entraînant l'extinction de certaines espèces ne pouvant pas se déplacer ou pas assez rapidement comme les plantes par exemple, ainsi que la modification de l'aire de répartition d'autres, rendant l'arrivée de certaines espèces, dans un nouvel habitat, potentiellement nuisible pour les espèces indigènes, favorisant dans le même temps l'arrivée et le développement de nouvelles maladies infectieuses (Mora et al., 2022).

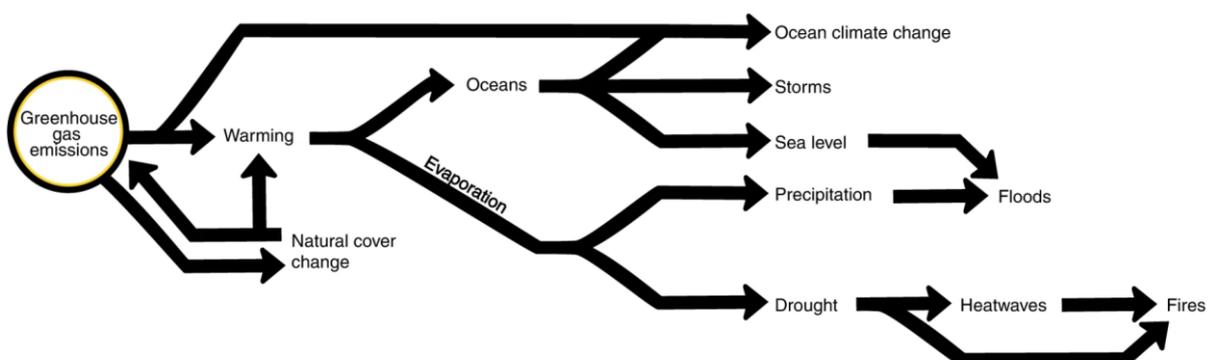


Figure 1 : Schéma simplifié représentant les principales conséquences des émissions de gaz à effet de serre sur les milieux et leurs interactions (Mora et al., 2022)

5.2.2 Risques microbiologiques

D'après une récente étude parue dans *Nature*, le changement climatique serait lui-même à l'origine de l'aggravation de plus de la moitié des pathologies infectieuses humaines connues (Mora et al., 2022). Sur les 375 maladies infectieuses recensées par Mora, C *et coll.* (2022), 278 seront aggravées par des aléas climatiques, et parmi lesquelles, 160 le seront à cause du réchauffement de l'atmosphère, 122 par des changements de précipitations, 121 par la fréquence accrue d'inondations, 81 par les sécheresses, 71 par les tempêtes, 43 par les changements océaniques (augmentation de l'acidité, de la température, réduction de la concentration en oxygène...), 10 par l'augmentation du niveau des mers (Mora et al., 2022). Les maladies les plus souvent aggravées étant celles provoquées par des bactéries ou des virus, avec respectivement, 69 et 76 maladies aggravées par un ou plusieurs aléas climatiques (Mora et al., 2022).

Les mécanismes à l'origine de l'augmentation des risques d'infection sont divers, le réchauffement du climat et les changements de précipitations peuvent modifier l'aire de répartition d'espèces pathogènes ou vectrices de pathogènes, par exemple, à la suite d'une sécheresse ou d'un feu de forêt la faune porteuse de pathogènes peut migrer sur de longues distances à la recherche de nourriture ou d'un nouvel habitat. Ainsi, certaines régions auparavant épargnées, vont subir l'émergence de nouvelles maladies contre lesquelles elles ne sont pas forcément préparées. Les aléas climatiques tels que les tempêtes et les inondations rapprochent les populations des agents pathogènes en contaminant les réseaux d'eaux par exemple. Le changement d'utilisation des sols est également un facteur de rapprochement, en effet, l'empiètement de l'Homme sur des zones sauvages lors de la déforestation favorise les interactions avec des agents pathogènes (Jones et al., 2013) et donc l'apparition d'épidémies. Ensuite, des hivers plus doux permettront à certains pathogènes de survivre, aggravant potentiellement certaines épidémies (Dengue, Zika) (Coates et al., 2020). On peut également évoquer la possible émergence ou résurgence de certains pathogènes, causée par la disparition du pergélisol (Wu et al., 2022), c'est le cas par exemple de la bactérie *Bacillus anthracis* à l'origine de l'anthrax, ou pire, de la variole, en effet, des "tombes de varioleux" sont présentes dans le Grand Nord. De plus, la variole étant considérée comme éradiquée, la majorité de la population n'est plus vaccinée, augmentant d'autant plus les risques (Nexon, 2020).

La dangerosité de certains pathogènes sera renforcée par les aléas climatiques, que ce soit par une accélération du cycle de vie, une amélioration des interactions avec les vecteurs, une diminution de la période d'incubation, une augmentation de la virulence, etc. A l'inverse, la capacité de l'Homme à faire face aux maladies peut être altérée, par exemple, certaines

maladies semblent infecter plus facilement l'Homme, lorsqu'il y a un changement des conditions météorologiques rapide, c'est le cas de la grippe (Liu et al., 2020). Les aléas climatiques peuvent également favoriser les comportements à risque, c'est le cas des sécheresses qui en diminuant l'accès à de l'eau potable peut forcer à l'utilisation d'eau insalubre favorisant l'apparition d'épidémies de choléra, de diarrhée ou de dysenterie (Calow et al., 2010). L'augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes, en endommageant certaines infrastructures favorise aussi l'apparition d'épidémies en réduisant l'accès aux soins (Nsuami et al., 2009) ou en contaminant les réseaux d'eaux potables (Ligon, 2006).

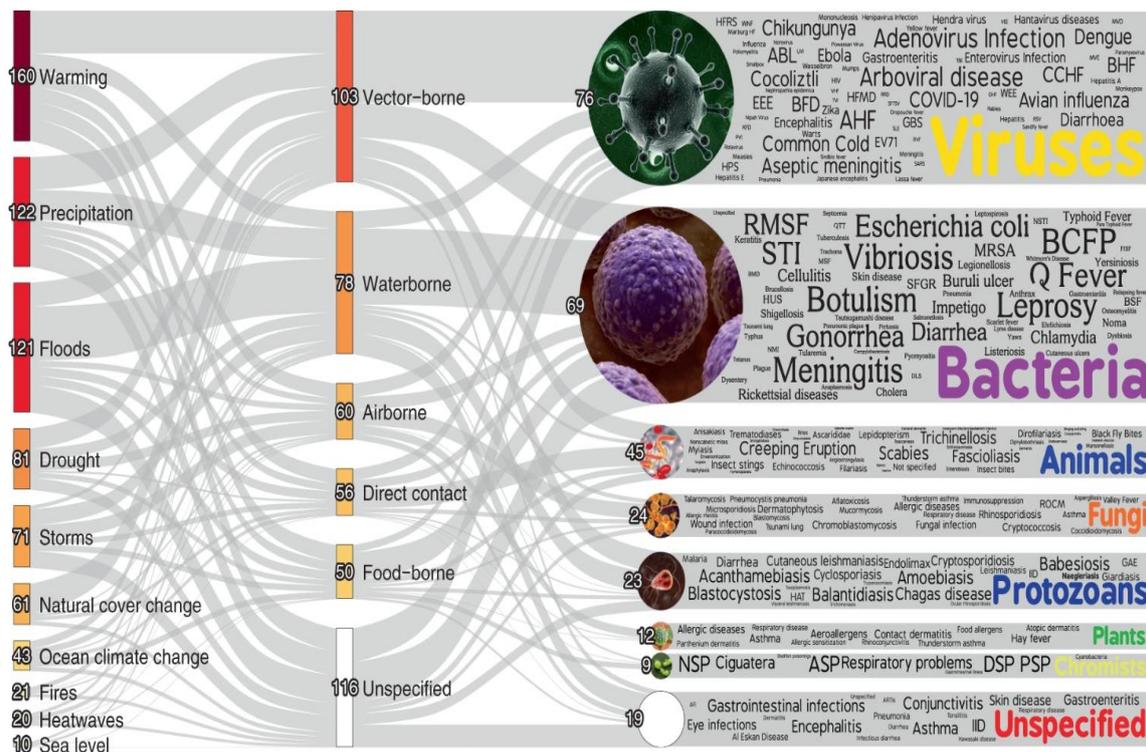


Figure 2 : Voies par lesquelles les aléas climatiques entraînent une augmentation du risque de certaines maladies selon le mode de transmission (Mora et al., 2022)

5.3 PROBLEMATIQUE LIEE A EDF

Du fait de ses activités de production d'électricité, EDF a un certain impact sur l'environnement, c'est notamment le cas de l'eau. En effet, la plupart des centrales thermiques, que ce soit à flamme (qui utilise différents combustibles fossile comme le charbon, le gaz ou le fioul (EDF)) ou nucléaire (qui utilise de l'uranium 235 ou du plutonium 239 comme combustible (AFCN, 2019)), ont besoin d'eau pour la production d'électricité et maintenir le bon fonctionnement de celles-ci, en refroidissant les combustibles et les différents circuits (AFCN, 2019).

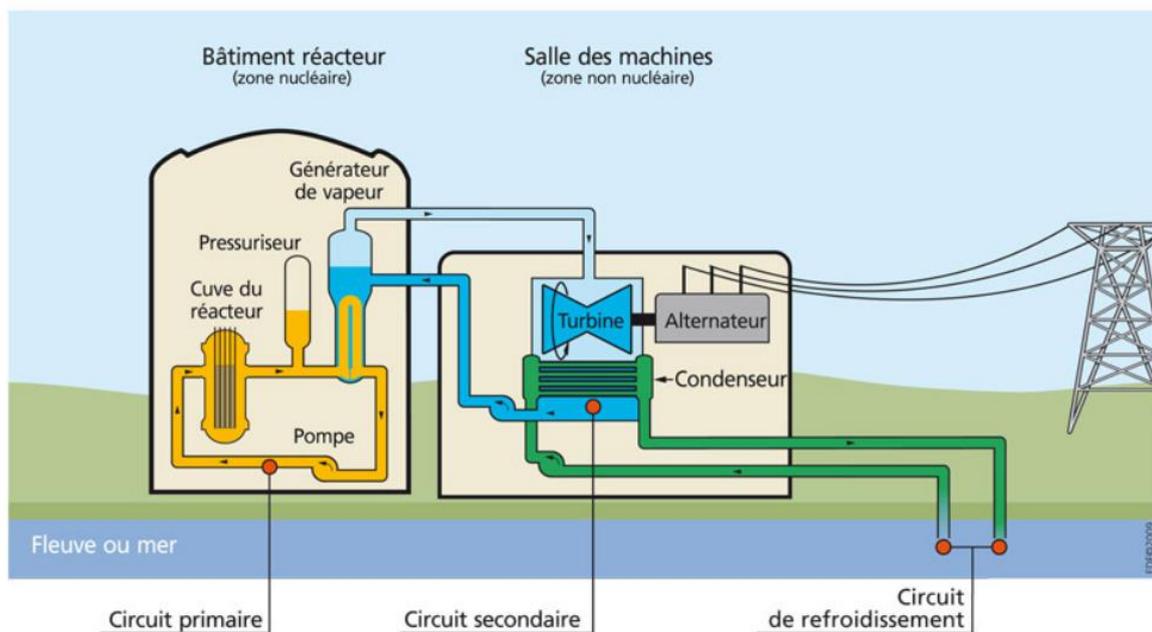


Figure 3 : Schéma du fonctionnement d'une centrale nucléaire sans aéroréfrigérant (IRSN, 2017)

Il existe deux types de refroidissement dans les centrales thermiques utilisant de l'eau, le refroidissement à circuit fermé et le refroidissement à circuit ouvert. Dans les centrales à circuit fermé, seule une petite partie de l'eau utilisée dans le circuit de refroidissement est retournée dans le cours d'eau à proximité, le reste circule en boucle dans le condenseur (= circuit de refroidissement) et est refroidie au moyen de tours aéroréfrigérantes (Vicaud & Jouen, 2015); tandis que dans une centrale à circuit ouvert, l'eau, une fois réchauffée, est retournée dans son cours d'eau d'origine (Vicaud & Jouen, 2015), la différence de température entre l'eau à la prise et au rejet pouvant atteindre une dizaine de degrés en faveur de la zone de rejet (Ifremer, 2021). Cela peut être problématique, car dans un climat changeant où les eaux

tendent à se réchauffer, l'addition de rejets thermiques par ces centrales, dans le milieu, risque potentiellement d'aggraver le problème en augmentant davantage la température de l'eau en aval de celles-ci. Ainsi, ces échauffements ont tendance à favoriser le développement de microorganismes, parmi lesquels certains peuvent être pathogènes pour l'Homme. C'est le cas des Vibrions qui regroupent une centaine d'espèces bactériennes connues, dont 12 peuvent infecter les humains.

Un autre type d'infrastructure présente également un risque microbiologique, ce sont les barrages hydroélectriques. En effet, ceux-ci retiennent de grandes quantités d'eau, permettant à certains agents infectieux et vecteurs de maladies de s'y développer, c'est le cas par exemple des schistosomes, responsables de la schistosomiase, de *Cryptosporidium* ou des moustiques et de leurs larves (Ziegler et al., 2013) (Petney & Taraschewski, 2011) (Kibret et al., 2019).

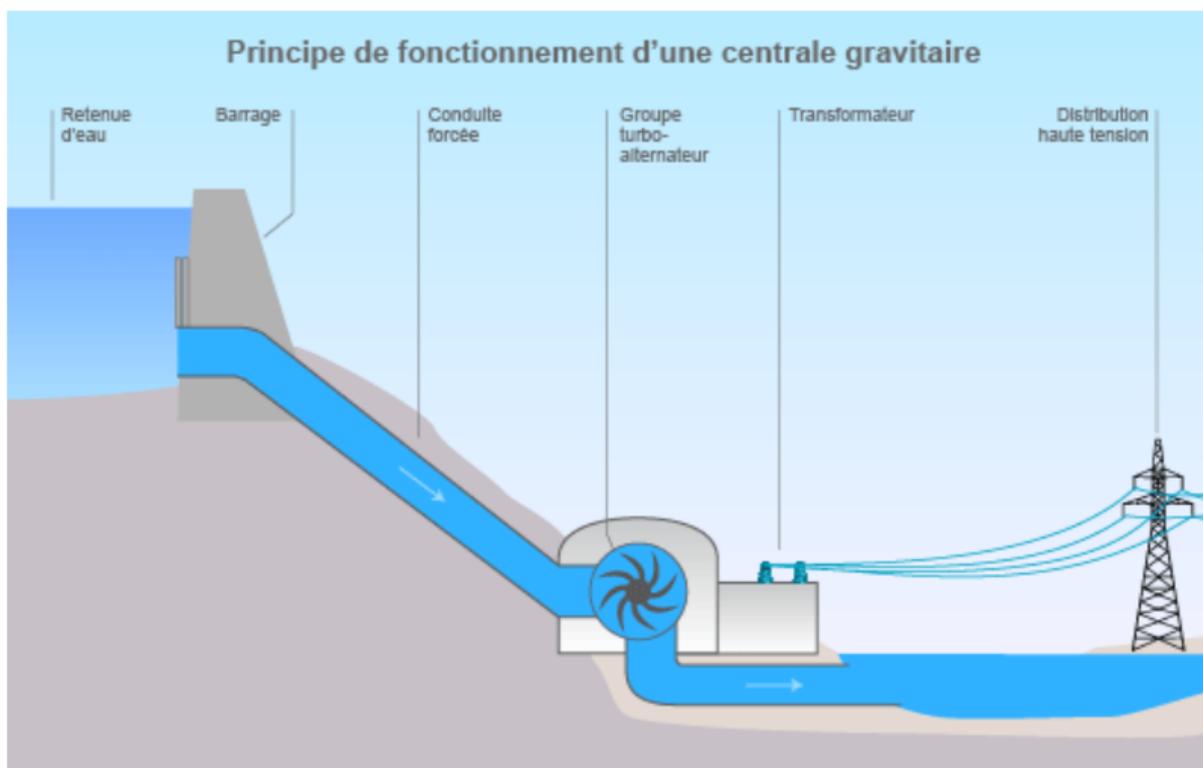


Figure 4 : Schéma du fonctionnement d'une centrale hydroélectrique (CDE, 2019)

L'objectif de ce mémoire sera, dans un premier temps, d'effectuer une synthèse bibliographique concernant l'impact du changement climatique sur un certain nombre de risques microbiologiques, puis, dans un second temps, de réaliser une évaluation des risques dans le but de savoir si l'augmentation des températures des eaux, provoquée par le réchauffement de l'atmosphère, peut avoir un impact significatif sur les concentrations de Vibrions, et plus particulièrement des espèces *Vibrio parahaemolyticus* et *Vibrio vulnificus*,

dans l'eau et dans les huîtres au niveau de la zone de rejet des centrales nucléaires. Ainsi, nous pourrions évaluer quel impact cela pourrait avoir sur le risque d'infection des individus lors de la pratique d'activités aquatiques (par ingestion accidentelle d'eau) ou lors de la consommation d'huîtres.

Pour cela, nous nous focaliserons sur la centrale de Gravelines, qui est le site où *Vibrio* est le plus suivi par EDF, et depuis le plus longtemps.

6 METHODOLOGIE

6.1 RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Comme nous l'avons vu dans l'introduction, le changement climatique a un impact sur la moitié des maladies infectieuses connues, il a donc fallu faire un choix quant aux pathogènes traités dans la partie sur les risques microbiologiques en lien avec le changement climatique. Pour cela, je me suis basé sur les pathogènes traités dans le rapport de l'EEA (Agence européenne pour l'environnement) de 2022 « *Climate change as a threat to health and well-being in Europe : focus on heat and infectious diseases* », ainsi que ceux traités dans un rapport de 2020, commandé par la DGRIS (Direction Générales des Relations Internationales et de la Stratégie), « *Impacts du changement climatique sur l'extension géographique des risques sanitaires* ». Les informations disponibles pour chacun des pathogènes ou maladies traitées ont été complétées à l'aide d'études trouvées grâce à PubMed, Google et Google Scholar.

6.2 EVALUATION DES RISQUES

La deuxième partie de ce mémoire sera consacrée à l'évaluation des risques. L'objectif est d'évaluer l'impact du changement climatique sur la concentration en Vibrions des eaux à proximité de la zone de rejet de la centrale de Gravelines et d'en déduire un risque pour la population.

Le site de Gravelines semble être le plus adapté à cette évaluation. En effet, c'est le premier à avoir mis en place un programme de surveillance écologique et halieutique. La surveillance microbiologique a commencé en 1978, celle-ci est devenue hebdomadaire à partir de 1986, et ne se concentre désormais plus que sur les Vibrions halophiles depuis 1989.

Deux modes de contaminations seront pris en compte pour réaliser cette évaluation. Le premier sera l'ingestion d'eau lors de la pratique d'une activité aquatique (baignade, kayak, voile, etc.) et le second sera la consommation d'huîtres crûes qui est le fruit de mer le plus

souvent en cause (90% du temps) lors de toxi-infection alimentaire liés à *Vibrio parahaemolyticus* et *Vibrio vulnificus* aux Etats-Unis (Froelich & Noble, 2016).

L'évaluation des risques de la FDA (2005) et de la FAO (2005), respectivement sur le risque lié à *V.parahaemolyticus* et *V.vulnificus* lors de la consommation d'huîtres aux Etats-Unis, sont les évaluations les plus solides concernant ce mode de contamination, ainsi nous utiliserons les modèles provenant de ces deux études pour calculer l'évolution des concentrations en Vibrions des huîtres à chacune des étapes de l'évaluation.

Les risques seront calculés pour trois périodes, actuelle (2020), à moyen terme (2050) et à long terme (2100) selon deux scénarios climatiques.

Les scénarios climatiques utilisés seront le scénario RCP 4.5 et le scénario RCP 8.5. Il existe 4 scénarios RCP, correspondant chacun à des niveaux d'émissions de carbones différents et donc à des températures atmosphériques différentes. Le chiffre associé aux scénarios RCP (2.6, 4.5, 6.0, 8.5) est le forçage radiatif (différence entre le rayonnement reçu et le rayonnement émis par la Terre) dû aux activités humaines, estimé en fonction des émissions de carbones prévues pour le scénario.

Le scénario RCP 4.5 correspond à, un scénario dans lequel les émissions de gaz à effet de serre se stabilise à un niveau faible avant la fin du siècle. Dans le scénario RCP 8.5, le plus pessimiste, les émissions ne se stabilisent pas et continuent au même niveau qu'aujourd'hui.

7 PRINCIPAUX RISQUES MICROBIOLOGIQUES EN LIEN AVEC LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

7.1 MALADIES VECTORIELLES

Les maladies vectorielles sont responsables d'environ 17% des maladies infectieuses et plus d'un million de décès par an dans le monde. La modification de l'aire de répartition géographique d'un vecteur peut se faire de 2 manières. Premièrement, par une modification

des conditions climatiques, telles que la température, ou l'humidité par exemple, rendant certaines régions propices à leur développement, et à l'inverse d'autres rendues inhospitalières. Deuxièmement, par l'intermédiaire des flux commerciaux et humains qui permettent la migration d'espèces sur de longues distances. Les principaux vecteurs de maladies vectorielles sont des arthropodes (moustiques, phlébotomes, puces, tiques...). (Nexon, 2020)

Vecteurs		Principales maladies	
ARTHROPODES			
Insectes	Moustiques	Genre <i>Aedes</i>	Chikungunya Dengue Fièvre de la Vallée du Rift Fièvre jaune Zika
		Genre <i>Culex</i>	Encéphalite japonaise Fièvre à virus West Nile Filariose lymphatique
		Genre <i>Anopheles</i>	Paludisme
	Phlébotomes		Leishmaniose Fièvre pappataci (fièvre à phlébotomes)
	Glossines ou mouches tsé-tsé		Trypanosomiase africaine (maladie du sommeil)
	Simulies		Onchocercose ⁴⁵
	Taons		Filariose à Loa Loa
	Réduves et triatomes		Trypanosomiase américaine (maladie de Chagas)
	Puces		Peste Rickettsioses
	Poux de corps		Typhus épidémique Fièvre des tranchées Fièvre récurrente Peste
Arachnides acariens	Tiques		Encéphalites à tiques Fièvre hémorragique de Crimée-Congo Fièvre récurrente (borréliose) Maladie de Lyme Rickettsioses (fièvre pourprée et fièvre Q) Tularémie Maladie de la forêt de Kyasanur
MOLLUSQUES			
Gastéropode d'eau douce	Schistosomes		Schistosomiase (bilharziose)

Tableau 1 : Principaux vecteurs et maladies associées

7.1.1 Moustiques

Le premier vecteur auquel on peut penser est le moustique. Il est le vecteur d'un certain nombre de maladies, lesquelles sont transmises par différents genres. Trois genres nous intéressent particulièrement, le genre *Aedes*, responsable de la dengue, la fièvre jaune, le

chikungunya ou encore Zika. Le genre Anophèles, à l'origine du paludisme, et le genre Culex, vecteur du virus du Nil occidental.

7.1.1.1 Genre Aedes

“Aujourd’hui, la dengue est l’une des principales maladies virales transmises par les moustiques dans le monde. Entre 2012 et 2020, le nombre de cas estimé a été quasi multiplié par 8, passant de 50 millions d’infections à près de 390 millions en 2020 [...] Aujourd’hui, la moitié de la population mondiale est exposée à la dengue” (Nexon, 2020) .

Au cours des 20 dernières années, *Aedes*, à l'origine présent en Afrique de l'Est, a migré d'abord vers l'océan Indien, l'Asie du Sud-Est, puis est arrivé en Europe et en Amérique. D'après les données de Santé Publique France, en 2022, les moustiques du genre *Aedes albopictus* étaient implantés dans 64 départements Français et à l'origine de 272 cas importés et 65 cas autochtones de dengue, 22 cas importés de chikungunya, ainsi que 3 cas importés de Zika (SPF, 2023a). Cette année-là le nombre de cas de dengue autochtones a été exceptionnel, en un an il y a eu plus d'infections que sur l'ensemble de la période 2010-2021 (65 en 2022 contre 48 entre 2010 et 2021) (Cochet et al., 2022). A une échelle plus large, en 2020, l'Europe a confirmé 1820 cas de dengues (ECDC, 2022b), 52 cas de chikungunya (ECDC, 2022a) et 17 cas de Zika (ECDC, 2023), tandis qu'en Amérique, en 2022, 2 809 818 cas de dengues ont été enregistrés, soit deux fois plus qu'en 2021, et 273 685 cas de chikungunya (SPF, 2023a). Les températures et un taux d'humidité plus élevés favorisent le développement des larves, allongent la survie des moustiques et augmentent le taux de piqûre de ceux-ci (EEA, 2022) . La probabilité d'infection de dengue est plus élevée dans les villes à cause des îlots de chaleur urbains (Araujo et al., 2015), et du fait que les villes sont des centres internationaux de voyage et de commerce, facilitant ainsi l'arrivée de nouvelles espèces. Ainsi, la susceptibilité climatique d'*Aedes albopictus* tend à augmenter, l'Europe de l'Ouest étant le plus à risque de voir son nombre d'infection augmenter. Finalement, l'augmentation de la susceptibilité climatique, de la durée de saison d'activité d'*Aedes albopictus*, plus l'augmentation du nombre de cas importés de dengue fait que cette maladie risque d'être un problème de santé publique important en Europe dans le futur (EEA, 2022) .

7.1.1.2 Genre Anophèles

Le moustique du genre Anophèles est responsable de la transmission de plasmodium, l'agent responsable du paludisme, actuellement la parasitose la plus importante dans le monde. On estime à 60 000 le nombre de décès supplémentaires liés à cette maladie entre 2030 et 2050 en raison du changement climatique (RBM, 2017) (Nexon, 2020). Certaines régions pourraient, d'ici 2050, avoir une probabilité accrue de transmission de l'ordre de 50%, causée par le changement climatique, c'est le cas en Afrique subsaharienne, en Amérique du Sud, mais également en Chine (RBM, 2017). *“La propagation du paludisme est fortement influencée par les changements de températures, les précipitations, ainsi que par la fréquence et la gravité des phénomènes météorologiques extrêmes tels que les cyclones”* (Nexon, 2020). En 2003, Tanser et coll. estimaient, dans une étude parue dans The Lancet, que le nombre de personnes-mois d'exposition au paludisme en Afrique s'élevait à environ 3,1 milliards par an et, selon leur modèle, d'ici 2100, ce chiffre pourrait augmenter de 16 à 28% suivant le scénario climatique utilisé (Tanser et al., 2003). De plus, cette augmentation, toujours d'après les résultats de leur modèle, serait principalement altitudinale, plutôt que latitudinale. Les 3 scénarios utilisés sont : un scénario avec des émissions de gaz à effet de serre faible, avec émissions moyennes-élevées et avec émission élevées. Dans le scénario de faibles émissions l'augmentation du nombre de personnes-mois d'exposition est la plus faible, en raison d'une diminution des précipitations et d'une plus faible augmentation des températures. Le deuxième scénario prévoit l'augmentation la plus importante pour 2020 et 2050, du fait d'une légère augmentation des précipitations et d'une forte augmentation des températures. Enfin, le dernier scénario montre la plus forte augmentation pour l'année 2100, avec une forte augmentation des températures et une réduction modérée des précipitations (Tanser et al., 2003). Finalement, l'Éthiopie, le Zimbabwe et l'Afrique du Sud seraient les pays observant la plus forte augmentation du nombre de personnes-mois d'exposition au cours du 21^{ème} siècle. A l'inverse, le Mali, le Ghana, le Burkina Faso, ainsi que la Namibie et le Mozambique verraient une baisse du nombre de personnes-mois d'exposition au paludisme, en raison d'un climat plus sec (Tanser et al., 2003). L'étude note, cependant, certaines limites comme la non prise en compte des circonstances démographiques et socio-économiques locales, ainsi que les dispositifs de lutte contre la transmission du paludisme.

En Europe, des cas sporadiques ont été détectés ces dernières années. Actuellement, la majorité des cas sont importés et proviennent de voyages internationaux ou d'immigration arrivant de pays dans lesquels le paludisme est endémique. En revanche, le nombre de mois propices à la transmission de la malaria a augmenté par rapport à la période 1951-1960 (EEA, 2022).

7.1.1.3 Genre *Culex*

Une maladie transmise par les moustiques moins connue du grand public, est la maladie à virus du Nil occidental (VNO), responsable d'atteintes neurologiques chez l'Homme (SPF, 2023c). Cette maladie à l'origine présente dans certaines régions d'Afrique et d'Asie fut importée en Europe par le biais d'oiseaux migrateurs. En effet, l'oiseau est le principal réservoir du VNO, mais il arrive qu'un moustique, dans la majorité des cas du genre *Culex*, se contamine lors d'un repas de sang sur un oiseau infecté, et le transmette à l'Homme au moment de la piqûre (SPF, 2023c). Depuis le milieu des années 90 le nombre de cas de VNO augmente et les épidémies en Europe sont de plus en plus récurrentes, intenses et géographiquement étendues, avec en 2019 et 2020 des premiers cas humains détectés en Allemagne et aux Pays-Bas (SPF, 2023d). De plus, en 2018, l'Europe a déclaré un nombre record de cas, avec 2083 cas, ce qui est bien plus que ce qui a pu être observé auparavant dans la région, où l'on a enregistré pour comparaison, 1832 cas au total sur les sept années précédentes (ECDC, 2018). En 2018, 27 cas d'infection humaine autochtone à VNO ont été identifiés par le dispositif de surveillance du VNO et des arboviroses sur le pourtour méditerranéen français et en 2022 6 cas ont été recensés selon les données de Santé Publique France (SPF, 2023b). L'augmentation des températures et l'allongement de la saison estivale en Europe, favorise le développement et la transmission du VNO des moustiques aux oiseaux et augmente également la probabilité de transmission chez l'Homme (EEA, 2022). Le changement climatique favorise la propagation de cette maladie dans de nouvelles régions, grâce à l'augmentation des températures, des précipitations et de l'humidité, ainsi qu'en modifiant les vents, influençant le parcours des oiseaux migrateurs (Nexon, 2020)

7.1.2 Mouches noires et onchocercose

Les mouches noires sont le vecteur de l'onchocercose ou "cécité des rivières", provoquée par un ver filaire du nom d'*Onchocerca volvulus*. Cette maladie sévit principalement en Afrique centrale, mais est également retrouvée, dans une moindre mesure, dans certaines régions d'Amérique du Sud. Ces mouches pondent dans des rivières où l'eau est chaude, 20,1°C pour le développement des stades immatures et une température constante de 30°C, pour permettre l'émergence du stade adulte (Nexon, 2020). Cependant, les mouches du genre *Simulium damnosum* se développent dans une eau à 16,3°C. En partant de ce fait, l'augmentation des températures due au changement climatique risque de voir l'aire de

répartition des mouches noires modifiée, permettant à la maladie de se propager dans des régions auparavant épargnées (Nexon, 2020) (Cheke & al., 2015) .

7.1.3 Punaises et Maladie de Chagas

Concernant la maladie de Chagas, provoquée par *Trypanosoma cruzi*, un parasite dont le vecteur est la punaise (ou triatome), un certain nombre de cas importés ont été notifiés en Europe, Asie et Océanie. A l'origine, cette maladie est endémique en Amérique latine et des cas autochtones ont récemment été détectés en Amérique du Nord (Nexon, 2020). L'OMS estime entre 6 et 7 millions le nombre de personnes infectées dans le monde, et est à l'origine d'environ 10 000 décès chaque année (OMS, 2023b). L'augmentation des températures pourrait être un facteur aggravant, en effet, lorsque les températures dépassent 30°C et que le taux d'humidité est faible, les triatomes ont tendance à se nourrir plus régulièrement afin d'éviter la déshydratation (Short et al., 2017), augmentant ainsi le nombre d'occasions de transmettre *Trypanosoma cruzi*. Il est donc important de renforcer la surveillance de cette maladie et de son vecteur, afin d'en limiter la propagation (Nexon, 2020). Actuellement, les Etats-Unis recensent environ 288 000 personnes infectées par *Trypanosoma cruzi* (Irish A et al., 2002), la grande majorité des cas étant des cas importés d'Amérique Latine (CDC, 2022).

7.1.4 Poux et tiques

Les tiques sont capables de transmettre un certain nombre d'agents infectieux, comme la bactérie *Borrelia burgdorferi* responsable de la maladie de Lyme, le virus de l'encéphalite à tiques, et le virus de la fièvre hémorragique de Crimée-Congo (FHCC). Les tiques peuvent également être vecteur de protozoaires responsables de la babésiose (Short et al., 2017). Le cycle de vie des tiques dépend de facteurs climatiques comme l'humidité et la température de l'environnement (Nexon, 2020).

A la base, les tiques responsables de la maladie de Lyme étaient localisées sur la Côte Nord-Est du continent Américain. Mais récemment la maladie est devenue autochtone en Europe, c'est le cas en particulier de la France, de la Suisse, de la Belgique, ainsi que dans les pays bordant la mer Baltique (Nexon, 2020). D'après Santé publique France, durant la période 2009-2020 le nombre de cas de Borréliose de Lyme a fluctué entre 25 000 et 68 000 chaque année, avec une tendance à la hausse depuis 2014 (SPF, 2022a). Aux Etats-Unis, une

augmentation des températures moyennes de 2°C pourrait accroître l'incidence de cette maladie d'environ 20% dans les prochaines décennies (Dumic & Severnini, 2018).

En Afrique sahélienne, les tiques transmettent les borrélioses tropicales. Ces tiques sont retrouvées dans des régions où la pluviométrie moyenne est inférieure à 750mm. *“La modification de la pluviométrie dans la bande sahélienne va donc avoir une incidence sur la répartition géographique”* des tiques (Nexon, 2020).

Pour ce qui est des poux qui sont des vecteurs du typhus exanthématique et de la borréliose, respectivement causés par des rickettsies et des bactéries du genre *Borrelia*, l'évolution de leur présence en Europe occidentale reste incertaine (Nexon, 2020).

7.2 MALADIES TRANSMISES PAR CONTACT AVEC DES MILIEUX CONTAMINES

7.2.1 Trématodes du genre *Schistosoma*

Ces trématodes sont des parasites chroniques à l'origine de schistosomiase ou bilharziose. La contamination se fait par contact cutanée avec une eau contaminée lors des baignades. Ils sont libérés par des gastéropodes d'eau douce. *“La zone de prévalence des schistosomiasés se situe dans les régions tropicales et subtropicales, notamment lorsque les conditions d'accès à l'eau potable et d'assainissement sont mauvaises”* (Nexon, 2020). En Corse, une centaine de cas de bilharziose urogénitale ont été détectés depuis 2014 (SPF, 2019).

D'après les modèles utilisés dans l'étude de Yang, G et coll. (2018), le changement climatique tend à augmenter ou déplacer, selon les régions, l'aire de distribution de la schistosomiase (Yang & Bergquist, 2018). La distribution des gastéropodes hébergeant ces parasites semble également être modifiée. Par exemple, les espèces *S. mansoni* et *S. haematobium*, actuellement présentes dans les zones sahariennes, pourraient migrer vers l'Ethiopie et d'autres hautes terres d'Afrique (Yang & Bergquist, 2018). De plus, les basses températures en hiver dans les régions plus au Nord seraient un des facteurs expliquant l'absence de schistosomes, du fait que les gastéropodes, qui leur sert d'hôte intermédiaire, ne survivent pas à des températures inférieures à 0°C pour l'espèce *Oncomelania*, 15,5°C pour *Biomphalaria* et 20°C pour *Bulinus* (Yang & Bergquist, 2018). Le problème est que cette étude ne prend en compte que les températures mais pas les changements de précipitations. Les régions parmi lesquelles le changement climatique entraîne une augmentation des précipitations et des

températures voient ou verront leur nombre de cas augmenter, c'est le cas par exemple dans les zones tropicales, dans les régions de l'Afrique du Sud-Est (McCreesh et al., 2015) ou encore en Chine où une expansion des cas vers le nord du pays est à prévoir (Zhou et al., 2008).

Il en est de même avec l'augmentation de la température de surface des zones maritimes côtières (Nexon, 2020).

7.2.2 *Campylobacter spp*

La campylobactériose provoquée par *Campylobacter spp* est la principale cause de gastro-entérite bactérienne, ainsi que la maladie d'origine alimentaire la plus fréquente en Europe (Gras et al., 2013), environ 246 000 cas sont officiellement déclarés sur le continent chaque année, néanmoins, le nombre de cas réel pourrait s'approcher de 9 millions (EFSA, 2023).

L'infection par *Campylobacter spp* se fait principalement par la consommation d'aliments contaminés, le plus souvent de la volaille (20 à 30% des cas dans l'UE (EFSA, 2023)), du lait non pasteurisé ou des légumes contaminés. D'autres sources de transmission ont pris de l'importance ces dernières années, on peut citer les animaux domestiques (Gras et al., 2013), ou encore l'eau utilisée à des fins récréatives.

Cette maladie est rarement mortelle, mais le coût économique, quant à lui, peut être assez important, en effet, l'agence européenne pour la sécurité alimentaire (EFSA) estime le coût en terme de perte de productivité dans l'Union Européenne à environ 2,4 milliards d'euros par an (EFSA, 2023). D'après l'OMS, *Campylobacter spp*, serait la cause d'un fardeau d'origine alimentaire de 1 à 3 millions d'années de vie corrigées de l'incapacité (AVCI ou DALYs) dans le monde (Havelaar et al., 2015) .

On constate que les régions tempérées ont tendance à être plus touchées. Les épisodes de précipitations, notamment les précipitations intenses, ainsi que les fluctuations de températures seraient propices à une augmentation des cas de campylobactériose humaine (Kuhn et al., 2020). De plus, l'augmentation des risques d'inondations associés pourrait favoriser le transfert de *Campylobacter* entre compartiments, via le ruissellement, des excréments d'animaux d'élevage, ou de fumiers chargés en agents pathogènes, dans les eaux de surface, mais également via le débordement des eaux usées humaines, qui pourrait entraîner une contamination de ces milieux aquatiques (Sterk et al., 2013). A l'inverse, les vagues de chaleur devraient diminuer l'incidence de la maladie. Selon Kuhn, K *et coll.*, 2020,

si les pics d'incidence qui ont lieu l'été ne devraient pas être plus importants, en revanche, la saison de *Campylobacter* pourrait s'allonger (Kuhn et al., 2020).

7.2.3 Légionelles

La légionnelle est une bactérie responsable de la légionellose, une maladie qui affecte les poumons et mortelle dans environ 10 % des cas. Le nombre de cas dans le monde est sous-estimé en raison d'un système de surveillance insuffisant et d'un manque de moyen pour diagnostiquer la maladie dans certains pays touchés, mais l'OMS estime en Europe, aux Etats-Unis et en Australie que l'incidence annuelle est d'environ 10 à 15 cas par million d'habitants (OMS, 2022). En France, le nombre de cas de légionellose oscille entre 1500 et 2000 cas par an, dont 10% mortels (SPF, 2022b). Les légionelles sont transmises par inhalation d'aérosols contaminés (OMS, 2022), de plus, il semble que des périodes de fortes températures, suivies de périodes de précipitations sont les conditions qui favorisent le plus les infections par légionelle. L'humidité créée par ces fortes précipitations améliore la survie des Légionelles en suspension dans l'air (Walker, 2018), favorisant la contamination. La saison estivale étant la plus propice aux contaminations par légionelles, le changement climatique risque d'allonger la période de contamination dans certaines parties du monde et principalement dans les régions tempérées. Un autre risque concerne les sécheresses, qui favorisent la récupération d'eau de pluie potentiellement contaminée, pour l'arrosage, le nettoyage des sols par exemple, augmentant ainsi, les risques d'expositions aux légionelles via les aérosols produits lors de ces activités (Walker, 2018). Une attention particulière doit être portée aux systèmes de refroidissement par évaporation (Walker, 2018).

7.2.4 Salmonelles

Agent pathogène d'origine alimentaire, le nombre de cas de gastro-entérite causé par cette bactérie est estimé à 93 millions, avec environ 155 000 décès en moyenne chaque année dans le monde (Akil et al., 2014). La saison estivale est la plus propice aux infections par Salmonelle. Les régions endémiques sont principalement des pays en développement, c'est le cas en Asie centrale et du Sud Est et dans de nombreuses régions d'Afrique, du Moyen Orient et d'Amérique latine. Au final, les études s'accordent à dire que l'augmentation des épidémies de Salmonelles est liée à l'augmentation des températures, et qu'ainsi le réchauffement du climat risque d'accroître la prévalence des maladies causées par *Salmonella*

(Akil et al., 2014). En ce qui concerne le rôle des précipitations et de l'humidité, les résultats sont moins clairs, certaines études montrent une augmentation du nombre de cas suite à des épisodes de pluies, tandis que d'autres ne trouvent aucune corrélation, il est donc important d'approfondir les recherches de ce côté-là (Akil et al., 2014).

7.2.5 Cryptosporidiose

La cryptosporidiose est une maladie diarrhéique, causée par *Cryptosporidium*, un parasite zoonotique. Dans le monde, l'incidence de cette maladie est d'environ 3 cas pour 100 000 habitants par an, cependant le nombre de cas pourrait être en réalité jusqu'à 100 fois plus élevé (Gerace et al., 2019). En Afrique subsaharienne et en Asie du Sud, *Cryptosporidium* est responsable de 5 à 15% des diarrhées modérées à sévères chez les nourrissons, ce qui en fait la deuxième cause de diarrhée dans ces régions chez cette population (Costa et al., 2020). En Europe, ce parasite représente 1 à 2% des diarrhées (CHU Rouen, 2023).

La plupart des études (Jagai et al., 2009) (Ikiroma & Pollock, 2021) montrent une association positive entre les températures, les précipitations et la cryptosporidiose (Lal et al., 2013). L'augmentation des températures permettrait l'allongement de la saison de transmission, ainsi que l'introduction de la maladie dans des zones auparavant trop froides (Lal et al., 2013). Les précipitations quant à elles, vont permettre le ruissellement, la remise en suspension des oocystes (Œuf du *Cryptosporidium* à l'origine de la contamination par ingestion), ainsi que la contamination des cours d'eau par les effluents d'eaux usées. A l'inverse, la diminution des précipitations peut augmenter la concentration de *Cryptosporidium* dans les cours d'eau, ainsi que leur introduction dans les eaux souterraines (Lal et al., 2013).

7.2.6 Leptospirose

La leptospirose est la zoonose bactérienne la plus répandue dans le monde. Les animaux réservoirs sont les rats et d'autres rongeurs, le bétail et certains animaux domestiques. L'infection se fait par contact avec des animaux contaminés, ou leur urine, mais également par ingestion d'aliments ou d'eau contaminés.

Les épisodes de fortes précipitations et d'inondations sont associés positivement avec des épidémies de leptospiroses (Lau et al., 2010). Ces épidémies sont favorisées par le rapprochement d'animaux hôtes vers l'Homme, la perturbation des structures de santé, ainsi

que les dysfonctionnements des réseaux d'eau et d'assainissement causés par ces inondations (Lau et al., 2010).

Ainsi, dans des zones où les épidémies de leptospirose sont déjà fréquentes, le réchauffement climatique risque d'augmenter encore leur fréquence, c'est le cas en Inde où la fonte toujours plus importante des glaces de l'Himalaya risque d'accroître le nombre et l'intensité des inondations que le pays peut connaître et de ce fait favoriser l'apparition d'épidémies (Majra & Gur, 2009).

Il en est de même pour les régions soumises à la montée du niveau de la mer, ou à des événements climatiques extrêmes plus fréquents (Asie du Sud, Moyen Orient, Afrique, Etats insulaires entre autres).

Concernant, la température, les leptospires survivent plus longtemps dans des environnements chauds et humides, ainsi des augmentations de cas de leptospirose ont pu être observés dans des certaines régions durant des périodes combinant fortes chaleurs et humidité, ce fut le cas par exemple en Guadeloupe entre 2002 et 2004, où le nombre de cas a quadruplé à la suite de deux épisodes El Niño (Storck et al., 2008).

L'augmentation des températures favorise également l'évaporation des sources d'eau de surface, favorisant l'utilisation de mêmes sources d'eau par les animaux et les humains, les premiers dans le but de boire, nager, etc. les seconds dans le cadre d'activités aquatiques comme la baignade, le canoë, par exemple (Lau et al., 2010) (Gubler et al., 2001).

7.2.7 Vibrio

Vibrio est une bactérie à Gram négatif de la famille des *Vibrionaceae*. On distingue deux types de Vibrions, les Vibrions cholériques, dont *Vibrio cholerae* O1-O139 est le représentant, qui sont responsables du choléra, et les Vibrions non cholériques, qui comprennent toutes les espèces de Vibrions qui ne transmettent pas le choléra (*Vibrio parahaemolyticus*, *Vibrio vulnificus*, *Vibrio cholerae non O1 non O139*...). On retrouve ces espèces dans les eaux saumâtres à salées des estuaires et des côtes, ainsi que dans diverses espèces marines (crustacés, mollusques, poissons) dans des conditions de température, salinité, pH ... variées. A noter que *Vibrio cholerae* peut aussi être retrouvé dans les eaux douces (Baker-Austin et al., 2018). Une centaine d'espèces de Vibrions ont pu être dénombrées, parmi lesquelles 12 sont considérées comme pathogène pour l'Homme (Baker-Austin et al., 2018), les principales étant *Vibrio cholerae* (O1-O139 et non O1-non O139), *Vibrio vulnificus*, *Vibrio alginolyticus* et *Vibrio parahaemolyticus* (Baker-Austin et al., 2018).

Les vibrions non cholériques (qui ne transmettent pas le choléra) sont à l'origine de la vibriose, un groupe d'infections caractérisées par une variété de manifestations cliniques selon l'espèce, allant des formes les plus bénignes telles que des maux de ventre ou des diarrhées à des formes beaucoup plus sévères pouvant aller de la septicémie, au décès (Baker-Austin et al., 2018). Ils peuvent être transmis par voie digestive lors d'ingestion d'eau contaminée ou suite à la consommation de produits de la mer contaminés, mais également par voie cutanée si une plaie entre en contact avec de l'eau contaminée ou à la suite d'une coupure, lors de l'ouverture d'une huître par exemple (Baker-Austin et al., 2018). Aux Etats-Unis, le nombre cas de vibriose chaque année est estimé à environ 80 000, parmi lesquels 52 000 sont provoqués suite à la consommation d'aliments contaminés (CDC, 2019). En France, ces dernières années le nombre de cas d'infections par des *Vibrio* non cholériques a significativement augmenté, passant de 10-15 cas annuel entre 1995 et 2016 à 50-70 entre 2018 et 2020 (CNR, 2021) (Figure 5) avec 70% des cas liés à la consommation de produits de la mer ou au contact direct avec de l'eau contaminée (CNR, 2021). Cependant, en France la vibriose n'est pas une maladie à déclaration obligatoire, sauf dans le cadre d'investigations de toxi-infection alimentaire collective (TIAC) (Anses, 2021), ainsi, le nombre de cas est probablement sous-estimé.

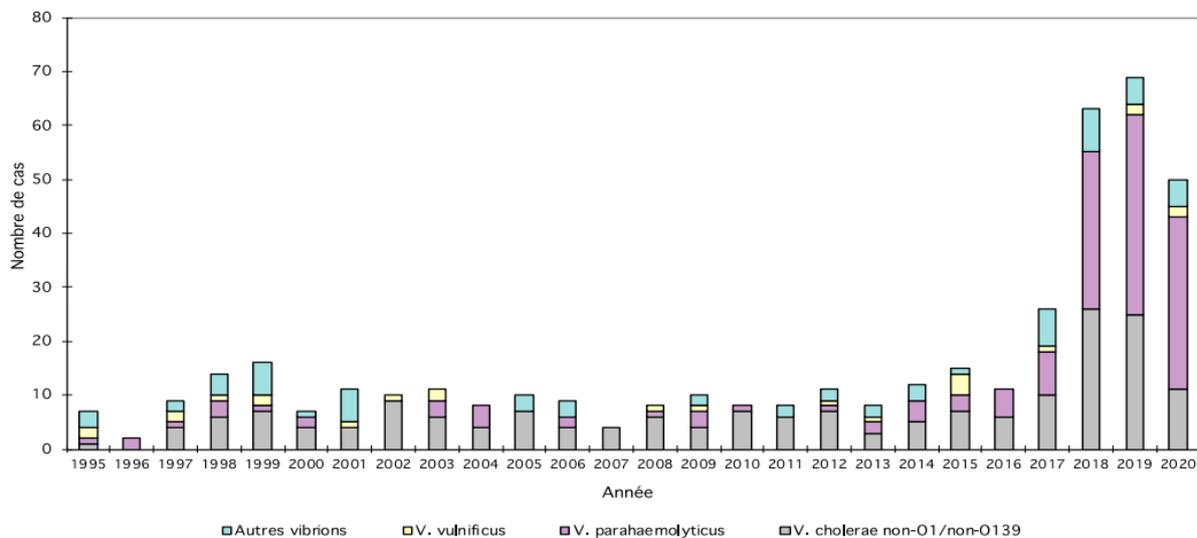


Figure 5 : Evolution du nombre de cas annuel d'infection par des vibrions non cholériques sur le territoire français entre 1995 et 2020 (CNR, 2021)

Les vibrions présentent un temps de réplication extrêmement rapide, allant jusqu'à 8-9 minutes pour *V. parahaemolyticus*. De ce fait, les espèces vibrions peuvent très rapidement s'adapter à des changements de conditions environnementales (Craig Baker-Austin et al., 2017). Les études s'intéressant aux conséquences du changement climatique sur *Vibrio* montrent un impact très probable de celui-ci sur les concentrations de Vibrions dans l'eau et les fruits de mers, ainsi que sur le nombre de cas d'infection (Le Roux et al., 2015; Nexon, 2020; RIVM, 2022). En effet, sa présence augmente dans les eaux côtières de l'Europe dû à l'augmentation rapide de la température des eaux de surface côtières (Vezzulli et al., 2012) qui, ces dernières décennies, est 4 à 7 fois plus rapide que dans les océans (Le Roux et al., 2015). Ainsi, une augmentation du nombre d'infections a été signalée ces dernières années, principalement dans les eaux côtières du nord de l'Europe où les conditions de température et de salinité sont les plus propices au développement de *Vibrio*, contrairement aux eaux de la Méditerranée, en raison d'une salinité de surface trop élevée (EEA, 2022). Ces augmentations de prévalence des cas sont fortement associées aux pics de températures de ces eaux (Le Roux et al., 2015). Effectivement, les pays du nord de l'Europe bordant la mer Baltique (Norvège, Suède, Finlande, Danemark, Pologne et Estonie), ont vu leur plus grand nombre de cas de vibriose durant les années exceptionnellement chaudes qu'ont été 2006, 2010, 2014 et 2018, avec un pic en 2018 à 445 cas annuels dans la région (le principal mode de transmission a été l'eau de mer), tandis que pour les années 2015-2017, ce chiffre était d'environ 100 cas par an (Amato et al., 2022). Aux Etats-Unis les projections semblent montrer une hausse des cas de vibriose dans le pays au cours du 21^{ème} siècle. Une étude réalisée par Sheahan, M et coll. (2022), visant à identifier les impacts du changement climatique sur le nombre de vibriose aux Etats-Unis, ainsi que sur le coût économique engendré par l'augmentation des cas, a montré que d'ici 2090, dans un scénario RCP 4.5, l'augmentation de la température de surface de la mer pourrait entraîner une augmentation annuelle des cas de 51%, voire de 108% pour le pire scénario qu'est le scénario RCP 8.5 (Sheahan et al., 2022). L'augmentation des précipitations pourrait également favoriser le développement de certaines espèces de Vibrions, ce fût le cas par exemple en Nouvelle-Calédonie où 3 cas d'infections par *V. vulnificus* ont été détectés sur l'île alors que ceux-ci ne sont pas habituels dans la région Pacifique Sud, ainsi, l'hypothèse est que de fortes précipitations dans la région ont entraîné une baisse de la salinité des eaux, permettant à *V. vulnificus* de se développer (C. Baker-Austin et al., 2017).

Concernant les *Vibrio* cholériques, la majorité des flambées récentes sont dues au séro groupe O1 (Nexon, 2020). En ce moment, l'Afrique est particulièrement frappée par une flambée d'épidémies, plus importantes et nombreuses qu'habituellement, certaines ayant

commencée depuis fin 2021, début 2022, sont toujours en cours (OMS, 2023c). Le taux de létalité moyen de la maladie est de 2,9% sur le continent Africain actuellement, alors que l'objectif, normalement, est de garder ce taux sous la barre des 1%. Les pays les plus touchés par ces épidémies sont le Malawi avec 55 000 cas enregistrés, la République Démocratique du Congo avec 25 000 cas environ, le Cameroun avec 15 000 cas et le Mozambique avec 11 000 cas (OMS, 2023c).

Les principaux réservoirs sont l'Homme et le milieu aquatique. Cette transmission se fait par voie féco-orale, ou indirectement via des aliments ou de l'eau contaminée, *“Les pays affectés par des catastrophes naturelles se retrouvent ainsi confrontés à une augmentation du risque de survenue d'épidémie de choléra”*. On retrouve également la maladie dans des lieux précaires comme les bidonvilles ou les camps de réfugiés où l'accès à l'eau potable peut être difficile (Nexon, 2020). *“Selon des études récentes, le changement climatique crée un environnement favorable au vibrion cholérique en augmentant la fréquence des pluies diluviennes, des inondations et des périodes de sécheresse qui compromettent la qualité de l'eau et de l'hygiène des aliments”* (Nexon, 2020).

7.3 INCERTITUDES CONCERNANT LES RISQUES MICROBIOLOGIQUES FUTURS

Le changement climatique semble avoir pour conséquence une modification des aires de répartitions géographiques des maladies infectieuses, ainsi qu'un allongement de la période de contamination.

Pour une même espèce, selon la lignée, la température optimale de transmission peut varier. C'est le cas, par exemple, du virus du Nil occidental, dont la lignée 1a de New-York a besoin de température plus élevée pour être transmise, que d'autres lignées de la même espèce (Lafferty, 2009). De plus, la survenue des maladies infectieuses est multifactorielle, ce qui peut rendre difficile l'identification du rôle précis des paramètres climatiques.

La prévalence de certaines maladies infectieuses a ou pourrait diminuer dans certaines régions avec le déplacement de l'aire de répartition de l'agent infectieux vers des latitudes plus hautes (Lafferty & Mordecai, 2016). Cela est dû à différents facteurs, par exemple un développement économique et un système de santé généralement plus performant des pays des hautes latitudes, permettant un meilleur contrôle de la transmission entre les individus. C'est le cas par exemple du paludisme, dont l'aire de répartition tend à s'éloigner de l'équateur,

mais qui voit son nombre de transmission diminuer à mesure que la maladie touche des pays plus développés.

La diminution de la capacité du vecteur, ou de l'hôte associé, à survivre ou à transmettre l'agent infectieux dans un climat qui devient plus chaud peut aussi expliquer la baisse potentielle de la transmission de certaines maladies infectieuses.

“En revanche, la plupart des espèces tropicales ont des courbes de réponse thermique étroites et une thermorégulation limitée. Si ces espèces sont mobiles, leurs aires géographiques devraient se déplacer vers des latitudes et des altitudes plus élevées. En revanche, les espèces sédentaires ou insulaires pourraient soit s'adapter à des températures plus chaudes, soit disparaître” (Lafferty & Mordecai, 2016).

7.4 RISQUES EN LIEN AVEC EDF ET SES ACTIVITES

Comme nous l'avons vu tout au long de cette partie, un certain nombre de maladie est, ou risque d'être impacté par le changement climatique. En plus des impacts direct des aléas climatiques sur les activités de certaines infrastructures d'EDF dépendantes du milieu dans lequel elles se trouvent, l'entreprise doit également faire face aux risques microbiologiques qui peuvent venir impacter les travailleurs sur le site ou bien les populations riveraines.

Pour commencer, un certain nombre d'étude a pu mettre en évidence un lien entre présence d'un barrage hydroélectrique et risque de maladies infectieuses. Tout d'abord, le risque infectieux le plus étudié est celui lié aux moustiques, en effet, les retenues d'eau des barrages hydroélectriques sont un lieu propice au développement des larves de moustiques, rendant les populations alentours vulnérables à certaines maladies transmises par celui-ci telles que le paludisme, la dengue, le chikungunya ou encore la filariose lymphatique (Kibret et al., 2017) (Kibret et al., 2019) (Yewhalaw et al., 2009). Dans leur étude Kibret, S et al., ont observé une augmentation du nombre de cas de paludisme chez les populations riveraines de barrages hydroélectriques (1268 pris en compte). Au total, sur les 15 millions de personnes exposées (Sur le continent Africain), 1,1 millions de cas chaque année seraient liés à ces infrastructures, parmi lesquels, 919 000 cas dus à la présence de 416 barrages dans des zones de transmission instable (Kibret et al., 2015) (l'incidence varie significativement au cours de l'année ou d'une année sur l'autre, généralement les populations de ces zones sont peu immunisées contre le pathogène (OMS, 2017)) et 204 000 cas en raison de la présence de

307 barrages dans des zones de transmission stable (Kibret et al., 2015) (l'incidence varie très peu dans le temps, dans ces zones les populations ont un niveau d'immunité important (OMS, 2017)). En France, des problèmes de moustiques liées aux retenues d'eau de barrages hydroélectriques sont également présents, c'est le cas dans les Alpes de Haute Provence où les habitants de Château-Arnoux-Saint-Auban sont chaque été, depuis plusieurs années, infestés de moustiques provenant de ce bassin qui longe la ville (Géli & Amar, 2023). Ensuite, la construction de barrages hydroélectriques peut également être associée à une augmentation des cas de schistosomiase humaine, ce fût par exemple le cas en Côte d'Ivoire à la suite de la construction de deux grands barrages dans les années 70 (N'Goran et al., 1997). Après leur construction, la prévalence globale de *Schistosoma haematobium* dans les échantillons d'urines et de selles d'écoliers provenant de villages riverains est passée, pour le barrage du lac Kossou, de 14 à 53%, tandis que pour le barrage du lac Taabo, la prévalence est passée de 0 à 73% (N'Goran et al., 1997). Cette augmentation dans la prévalence pourrait s'expliquer par le fait que les gastéropodes vecteurs de ce parasite se développent mieux lorsque le débit de l'eau est plus faible (Short et al., 2017). Enfin, d'autres affections telles que les gastro-entérites, les encéphalites ou les fièvres hémorragiques ont vu leur prévalence augmenter à la suite de projets de barrages (Lerer & Scudder, 1999).

Concernant les centrales thermiques les principaux risques proviennent des amibes, des légionelles en eau douce et des vibrions en eau de mer. Une étude menée en Inde, à proximité d'une centrale nucléaire, a observé une augmentation de la représentativité de certains microorganismes, dont *Vibrio* faisait partie, au niveau des rejets thermiques comparé à une zone témoin. Une proportion de *Vibrio* de 2,57% était observée dans la zone de rejet thermique, contre 0,5% dans la zone témoin (Rajeev et al., 2021). Néanmoins, l'étude explique que cette augmentation de la représentativité de *Vibrio*, ou au moins une partie de cette augmentation, peut être possiblement imputée à la diminution de la représentativité d'autres espèces de microorganismes dans la zone de rejet thermique.

8 EVALUATION DES RISQUES

Cette évaluation des risques portera sur les Vibrions et plus particulièrement sur les espèces *V.parahaemolyticus* et *V.vulnificus* dans la zone de rejet thermique de la centrale nucléaire de Gravelines.

8.1 CARACTERISATION DES DANGERS

8.1.1 Identification des dangers

8.1.1.1 Choix des pathogènes

Les espèces de Vibrions choisies pour cette évaluation, sont *Vibrio parahaemolyticus* et *Vibrio vulnificus*. Ceux-ci, font l'objet d'un programme de surveillance écologique et halieutiques des sites mis en place depuis 1978 sur le site de Gravelines et qui s'est poursuivi par la suite sur les sites de Le Blayais en 1987, Paluel en 1992, Flamanville et Penly en 1992, permettant, entre autres, de suivre l'évolution des concentrations dans l'eau de différentes espèces de Vibrions, qui varient en fonction du site, en amont et en aval des centrales afin de mesurer l'impact du réchauffement par circuit de refroidissement ouvert. D'après les rapports de surveillance, le site de Gravelines est celui qui présente l'impact le plus important sur les concentrations en *Vibrio* en aval de la centrale. En effet, chaque année, on observe, durant la période estivale, une augmentation de l'abondance en vibrion non cholérique dans l'eau, entre le point de prise et le point de rejet de la centrale nucléaire de Gravelines (Ifremer, 2021). En 2020, la période estivale fût plus chaude que les années précédentes et cette différence entre les deux points a été significativement plus importante, allant jusqu'à un facteur multiplicatif de 772 en juillet et de 64 sur l'année entière (Ifremer, 2021). De plus, au fil du temps une relation a pu être mise en évidence entre la température de l'eau en aval de la centrale et sa concentration en vibrions (Ifremer, 2021). Cependant, aucune évaluation prenant en compte différents scénarios climatiques n'a été effectuée par EDF pour *Vibrio*, tandis que les augmentations de prévalence des cas sont fortement associées aux pics de températures de ces eaux (Le Roux et al., 2015). Parmi l'ensemble des espèces de *Vibrio* non cholériques, seules *V. parahaemolyticus* et *V. vulnificus* ont été gardés car ce sont, premièrement, les deux espèces *Vibrio* les plus étudiées et pour lesquels nous avons le plus de données, notamment aux Etats-Unis où les infections sont à déclaration obligatoire contrairement à la France et aux pays européens. Deuxièmement, ces deux espèces sont associées à des contaminations par voie orale, survenant lors de l'ingestion accidentelle d'eau durant les activités aquatiques ou lors de la consommation de fruits de mers crus ou mal cuits, rendant la mise au point d'un modèle dose-réponse plus simple que pour d'autres voies de contamination, notamment la voie cutanée. Troisièmement, les données semblent indiquer une augmentation des infections

causées spécifiquement par *V.parahaemolyticus* et *V.vulnificus* en lien avec le changement climatique et le réchauffement des eaux induit, ainsi qu'une migration des cas vers des latitudes plus élevées. Enfin, des modèles de relations doses-réponses, réalisés par la FDA en 2005, sont disponibles, ce qui permettra d'avoir un risque d'infection potentiel pour les différents scénarios climatiques étudiés. Des espèces comme *V.alginolyticus* et *V.cholerae* non O1 non O139 n'ont pas été prises en compte ici en raison d'un manque de données pour la première et d'une absence de relation dose-réponse pour la seconde.

8.1.1.2 *Vibrio parahaemolyticus*

8.1.1.2.1 Epidémiologie

8.1.1.2.1.1 *Formes cliniques et symptômes*

Les infections par *Vibrio parahaemolyticus*, lorsqu'il y a présence de manifestations cliniques, causent dans la quasi-totalité des cas des gastro-entérites caractérisées par des douleurs abdominales, des crampes ou des diarrhées aqueuses, parfois sanglantes avec vomissement et fièvre. Il peut arriver, dans des cas exceptionnels, qu'il y ait l'apparition d'une septicémie ou d'une fasciite nécrosante fulminante, caractérisée par une nécrose rapide du tissu sous-cutané, chez des individus immunodéprimés ou atteints de maladies sous-jacentes (Anses, 2018) (Ghenem et al., 2017). Une fois la personne contaminée, la période d'incubation peut durer de 4 à 96h, mais est en générale comprise dans un intervalle de temps de 12 à 24h et une fois les symptômes apparus ceux-ci restent présents 1 à 3 jours (Anses, 2018).

8.1.1.2.1.2 *Modes de contamination et incidence*

La grande majorité des contaminations se font via la voie digestive, lors de la consommation de produits de la mer crus ou mal cuits, ou lors de l'ingestion d'eau contaminée durant la pratique d'activités aquatiques. Cependant, dans de rares cas, la contamination peut se faire par voie cutanée, cela va se produire lorsqu'une plaie est exposée à de l'eau contaminée par *V.parahaemolyticus*, ou bien en se blessant durant l'ouverture de coquillages (Anses, 2012b). D'après un rapport de l'Anses de 2018, en France, sur la période 1997-2017, *Vibrio parahaemolyticus*, est à l'origine de 46 contaminations (90% liées à la consommation

de produits de la mer), dont 40 ont conduit à une gastro-entérite (sachant que ces chiffres sont très probablement sous-estimés en raison de l'absence de déclaration obligatoire en France) (Anses, 2018).

8.1.1.2.1.3 Populations sensibles

Les populations à risque de formes sévères sont les très jeunes enfants, les personnes âgées et les personnes immunodéprimées ou avec une maladie hépatique (Anses, 2012b).

8.1.1.2.2 Facteurs de virulence

Les caractéristiques de virulence vont exercer une influence importante sur la capacité de l'agent à induire une pathologie chez l'hôte. Pour *V.parahaemolyticus*, la présence du gène *tdh* et/ou *trh*, qui produisent respectivement la « thermostable direct hemolysin » et la « thermostable-related hemolysin », sont les deux facteurs de virulence qui permettent de différencier les souches pathogènes des non-pathogènes (WHO & FAO, 2005a). Un rapport de l'Anses estime que 0,2 à 5% des souches de *V.parahaemolyticus* présentent au moins un de ces deux gènes (Anses, 2012a).

8.1.1.2.3 Conditions de croissance

Vibrio parahemolyticus peut se développer dans des milieux avec une salinité comprise entre 0,5 et 10%, son optimum de croissance étant situé entre 1,5 et 3%. Concernant la température, cette espèce est capable de croître entre 5 et 43 °C avec un optimum à 37 °C (Anses, 2012b).

8.1.1.3 *Vibrio vulnificus*

8.1.1.3.1 Epidémiologie

8.1.1.3.1.1 Formes cliniques et symptômes

Vibrio vulnificus est l'espèce de Vibrions avec le taux de mortalité le plus élevé et l'agent pathogène d'origine alimentaire le plus mortel dans le monde (Oliver & Jones, 2015). Aux Etats-Unis 33% des infections causées par cette bactérie mènent au décès du patient et 95% des décès liés à la consommation de fruits de mer sont dus à *V. vulnificus* (Coerdts & Khachemoune, 2021). Les trois symptômes provoqués par ce dernier sont la septicémie primaire, qui est le symptôme le plus courant, représentant environ 60% des cas observés, avec un taux de mortalité de 50% (Haftel & Sharman, 2023). On estime qu'environ 80 à 90% de tous les patients développant une septicémie primaire ont une ou plusieurs pathologies sous-jacentes (Haftel & Sharman, 2023). Ensuite, on retrouve l'infection des plaies qui est observée dans 25% des infections par *V. vulnificus*, celle-ci peut évoluer vers une fasciite nécrosante puis en septicémie. Ici le taux de mortalité est de 25%, mais celui-ci monte à 54% chez les patients atteints de maladies hépatiques (Haftel & Sharman, 2023). Enfin, le patient peut également développer des symptômes gastro-intestinaux bénins dans 10 à 15% des cas (Haftel & Sharman, 2023).

8.1.1.3.1.2 Modes de contamination et incidence

Les modes de contaminations de *V. vulnificus* ne diffèrent presque pas de ceux de *V. parahaemolyticus*, en effet, les infections se font lors de la consommation de produits de la mer contaminés, et lorsqu'une plaie est exposée à de l'eau contaminée (Heng et al., 2017). En Europe, on observe la présence de *V. vulnificus* dans moins de 20% des poissons et fruits de mers, tandis qu'en Chine et aux Etats-Unis cette espèce a pu être détectée dans plus de 50% des échantillons de produits de la mer, voire 100% dans les huîtres récoltées dans le golfe du Mexique durant les mois les plus chauds (mai à octobre) (BfR, 2022) (Heng et al., 2017). D'après les données de la FDA, sur les 180 cas de septicémies primaires causées par *V. vulnificus* entre 2002 et 2007 aux Etats-Unis, 92,8% des patients ont déclaré avoir consommé des huîtres crues avant l'apparition des symptômes, ce qui en fait la principale source d'infection dans ce pays et la principale cause de mortalité associée à la consommation de fruits de mer (Heng et al., 2017; Jones & Oliver, 2009). Chaque année aux Etats-Unis, environ 50 cas d'infections par *V. vulnificus* sont recensés, avec 45 hospitalisations et 16 décès pour l'année 2013 (Heng et al., 2017). Concernant la France, entre 1995 et 2017 seulement 3 cas d'infections par *V. vulnificus* ont été déclarés, tous sont survenus en Nouvelle-Calédonie

suite à la consommation d'huîtres, et chacune a entraîné une septicémie primaire menant au décès des individus (Anses, 2018).

8.1.1.3.1.3 Populations sensibles

Il semble y avoir un plus grand risque d'infection chez les hommes (86% des cas) que chez les femmes (14%), c'est ce que montrent les résultats de plusieurs études menées dans différentes régions du monde (Chang et al., 2019; Baker-Austin & Oliver, 2018; Lee et al., 2013). Effectivement, les hommes seraient 6 fois plus à risque de contracter une infection à *V.vulnificus* que les femmes (Baker-Austin & Oliver, 2018). Cette différence pourrait être due à différents facteurs, tels qu'une plus grande consommation de fruits de mers par les hommes, une plus grande susceptibilité à effectuer des activités récréatives à risques, ainsi qu'une plus grande proportion d'affections à risques sous-jacentes (maladie du foie, immunitaire, diabète, hémochromatose) (Baker-Austin & Oliver, 2018). En effet, la cirrhose alcoolique est présente chez 31 à 43% des patients atteints de septicémie primaire, la présence d'une maladie hépatique sous-jacente chez 24 à 31% des patients, l'abus d'alcool sans maladie hépatique chez 12 à 27% des patients, une hémochromatose héréditaire chez 12% d'entre eux et 7 à 8% sont atteints d'une maladie chronique telle qu'un diabète sucré, un lymphome, une insuffisance rénale chronique, etc (Morris & al., 2007).

Il existe également une disparité entre les classes d'âges. Effectivement, les données de surveillance épidémiologique des cas de *V.vulnificus* signalés aux Etats-Unis montrent que chez les individus de moins de 30 ans le nombre de cas est faible avec un taux de mortalité inférieur à 2%, tandis que chez les individus âgés de 41 à 60 ans le nombre de cas est beaucoup plus important, avec un taux de mortalité avoisinant les 50% (Baker-Austin & Oliver, 2018).

Le fer présent dans le sérum humain va également jouer un rôle dans la croissance de *V.vulnificus*, sa croissance étant liée au pourcentage de saturation de la transferrine, de fait, lorsque la saturation en fer de la transferrine dépasse 70%, la croissance de la bactérie augmente fortement (Morris & al., 2007). Cela pourrait expliquer la susceptibilité plus importante, des individus souffrants d'hémochromatose, à développer une infection grave liée à *V.vulnificus* (Morris & al., 2007).

8.1.1.3.2 Facteurs de virulence

V. vulnificus possède deux principaux facteurs de virulence, Vvha, une hémolysine, et la toxine MARTX (multifunctional autoprocessing repeats-in-toxins). Cette dernière jouerait un rôle primordial dans la dissémination bactérienne de l'intestin et de la septicémie qui s'en suit (Morris & al., 2007). Cependant, aucun facteur de virulence ne permet de différencier clairement les souches cliniques des souches environnementales. En revanche, il existe 3 biotypes de *V. vulnificus*, le biotype 1 étant celui qui est rencontré dans la quasi-totalité des cas d'infections humaines et se retrouvant la plupart du temps dans les crustacés et les mollusques, le biotype 2, infectant les anguilles mais rarement les humains, et le biotype 3, qui lui est limité à la région d'Israël, et semble être un clone recombinant des deux autres biotype de *V. vulnificus*, ce biotype est associé à des infections de plaies et des septicémies lors de la manipulation de tilapias d'élevage (une espèce de poisson d'eau douce) (Vickery et al., 2007; Baker-Austin et al., 2010) (Bisharat et al., 2005). Des tentatives de classification ont eu lieu afin de différencier les souches pathogènes des non-pathogènes, par exemple, dans leur étude Vickery, M et coll. (2007) ont pu mettre en évidence, grâce à une méthode d'analyse moléculaire, deux types d'ARN 16S chez des souches de *V. vulnificus* provenant d'isolats cliniques et non cliniques d'huîtres, l'ARN 16S type A et l'ARN 16S type B (Vickery et al., 2007). L'ARN 16S de type B était présent dans 94% des isolats cliniques, tandis qu'il était présent dans seulement 6% des isolats non cliniques (Vickery et al., 2007).

8.1.1.3.3 Conditions de croissance

Vibrio vulnificus peut se développer dans des milieux avec une gamme de salinité allant de 0,5 à 3% de chlorure de sodium et une gamme de température qui peut aller de 15 à 42°C (Oliver & Jones, 2015). Son taux de croissance est optimal pour une salinité comprise entre 1,5 et 2 %, et lorsque la température est comprise entre 30 et 35 °C (Jones, 2014).

8.1.2 Relation dose-réponse

Pour *Vibrio parahaemolyticus*, la relation dose-réponse utilisée ici provient de l'évaluation des risques de la FDA (2005), qui se base sur les données de différentes études regroupant 20 volontaires à qui différentes concentrations de *V. parahaemolyticus* pathogènes ont été administrées. Au total 9 participants ont développé des symptômes de gastroentérite. Lors de l'administration de doses allant de 10^2 à 10^5 UFC de *V. parahaemolyticus* pathogènes, aucun d'entre eux n'a présenté de symptômes. Cependant, pour une dose de 10^6 UFC sur

quatre individus, un seul est tombé malade, à 1×10^7 et 3×10^7 , deux sur quatre, et 10^9 les quatre volontaires étaient malades (FDA, 2005).

A partir de ces données un modèle Beta-Poisson a pu être développé, permettant ainsi de prédire le risque d'infection d'un individu, selon la concentration de Vibrions pathogènes à laquelle il a été exposé.

L'équation du modèle dose-réponse est la suivante :

$$P_{\text{inf/d}} = 1 - \left(1 + \frac{D}{\beta}\right)^{-\alpha}$$
$$DMI_{50} = \beta(2^{1/\alpha} - 1) \quad (\text{FDA, 2005})$$

Avec comme valeur, après réajustement des paramètres α et β sur les données réelles de surveillance de la FAO aux Etats-Unis (FDA, 2005) (ces valeurs sont seulement valables pour *V.parahaemolyticus*) :

$$\alpha = 0,5821452$$

$$\beta = 35\,529\,151$$

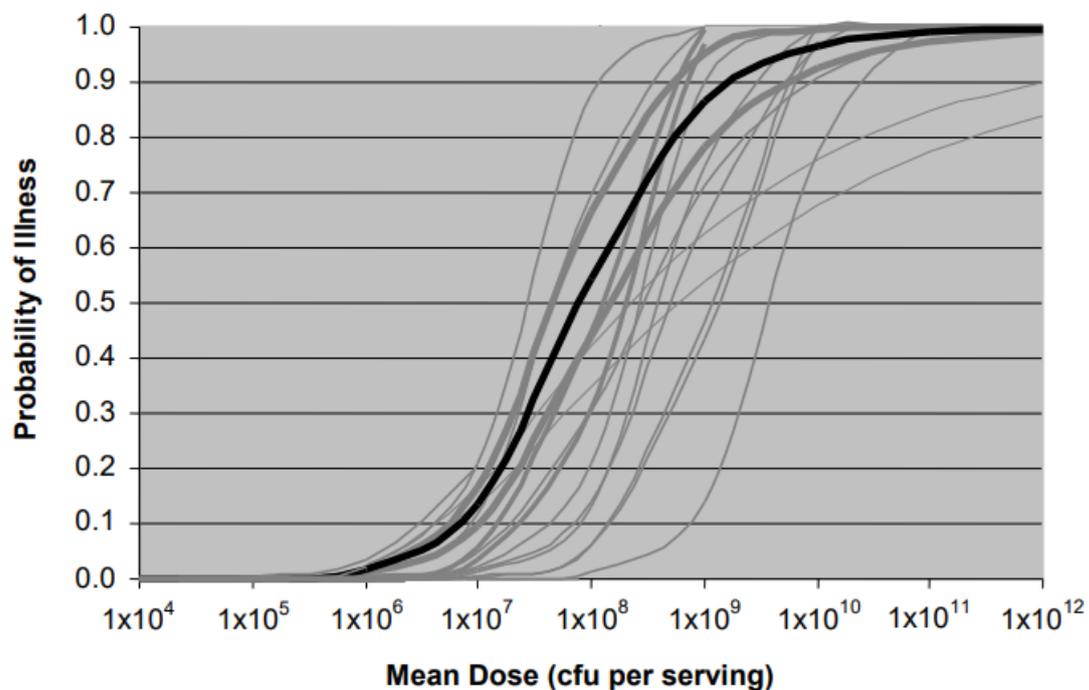


Figure 6 : Graphique représentant la probabilité de maladie en fonction de la dose moyenne de *Vibrio parahaemolyticus* pathogène (en UFC) ingérée (FDA, 2005)

D'après ce modèle, la probabilité de maladie est de 50% (DI50) pour une dose d'environ 100 millions d'UFC. A moins de 1000 UFC la probabilité d'infection est inférieure à 0,001 et la probabilité de tomber malade devient maximale pour des doses supérieures à 10^9 UFC (Figure 6) (WHO & FAO, 2005a).

Cependant, les données d'études utilisées pour développer ce modèle présentent un certain nombre de limites, parmi lesquelles on peut citer :

- La non prise en compte du statut immunitaire des volontaires (déjà infecté par *parahaemolyticus* ou non)
- L'administration de l'agent pas toujours via une matrice alimentaire et jamais via fruits de mer, ce qui peut modifier la dose infectieuse
- L'utilisation d'antiacides pour limiter l'impact de l'acide gastrique sur *parahaemolyticus* et ainsi réduire la variabilité chez les volontaires
- Le peu de sujets dans les études utilisées et manque parfois d'informations sur l'âge, le sexe et l'état de santé des sujets

D'après le rapport de la FAO (2005), le modèle de relation dose-réponse pour *V.vulnificus* est le même que pour *V.parahaemolyticus*, à la seule différence qu'ici, pour les meilleures estimations après ajustement des paramètres, α vaut $9,3 \times 10^{-6}$, tandis que β vaut 110 000 (WHO & FAO, 2005b).

8.2 EVALUATION DE L'EXPOSITION

8.2.1 Calcul de la concentration en pathogène de l'eau dans la zone de rejet

8.2.1.1 Relation entre température de l'eau et concentration en Vibrions totale

D'après une étude de la Rijkinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM : Institut national de la santé et de l'environnement) menée aux Pays-Bas, qui s'est intéressée aux concentrations et au risque de maladie dû à *Vibrio* dans les eaux de baignade, de

conchyliculture, ainsi que dans les fruits de mer, pour chaque degré Celsius supplémentaire de l'eau, la concentration de Vibrions est augmentée d'un facteur 1,5 dans l'eau (RIVM, 2022).

Dans son rapport de surveillance de 2020, l'Ifremer a également construit une courbe de relation entre la température de l'eau et la concentration en Vibrions totale (Figure 7). Nous utiliserons comme référence la courbe correspondant aux données de 1997 à 2020 car celle-ci prend en compte un plus grand nombre d'échantillon que la courbe des données de 2020.

L'équation de la courbe est de forme :

$$Y = 0,7268e^{0,3985x}$$

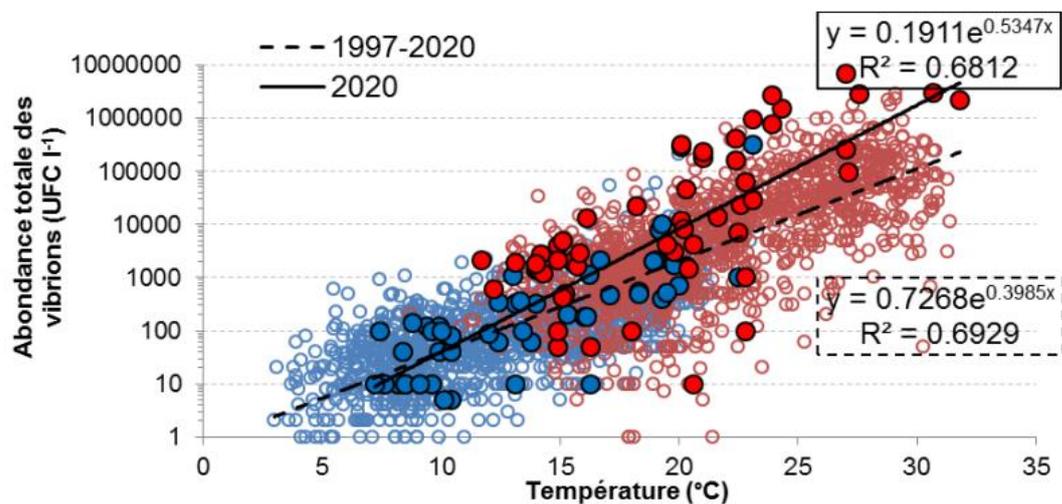


Figure 7 : Relation entre température de l'eau et concentration en vibrions aux canaux de prise (bleu) et de rejet (rouge) pour les périodes 1997-2019 (cercles vides) et 2020 (cercles pleins) sur le site de Gravelines. Droites de régression 1997-2019 (trait en pointillé) et 2020 (trait plein) (Ifremer, 2021)

En utilisant cette équation nous trouvons le même facteur multiplicatif que dans l'étude de la RIVM, c'est-à-dire 1,5 (Annexe B).

Par ailleurs, on peut également noter que les concentrations en Vibrions au point de rejet sont environs 3 à 4 ordres de grandeurs supérieurs à celles relevées au point de prise d'eau de la centrale.

8.2.1.2 Proportion moyenne de *Vibrio parahaemolyticus* et *V. vulnificus* dans la zone de rejet

Pour calculer la proportion de *V. parahaemolyticus* et *V. vulnificus* dans la zone de rejet, nous utiliserons les données de surveillance de l'Ifremer qui montrent qu'à cet endroit, la proportion moyenne de *V. parahaemolyticus* (2007-2015) comparée à la concentration de vibrions totale est de 5%, tandis que pour *V. vulnificus* la proportion de l'espèce sur le total de Vibrions est de 4% (Figure 8).

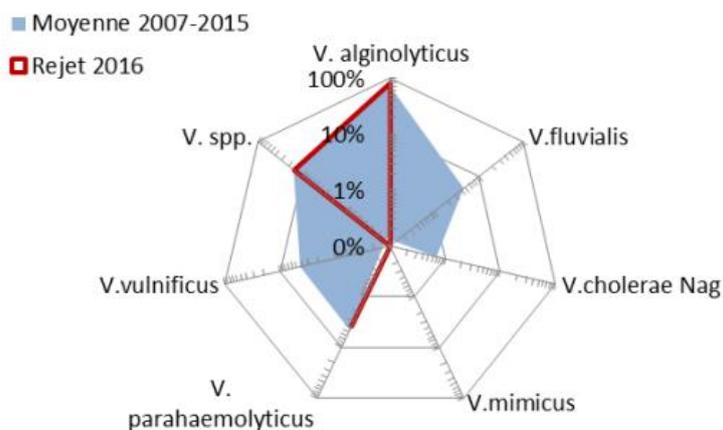


Figure 8 : Distribution des espèces de Vibrions mesurées dans la zone de rejet pour l'année 2016 (en rouge) et pour la période 2007-2015 (en bleu) (Ifremer, 2017)

A présent, regardons la température moyenne des eaux au point de rejet durant la période estivale, afin d'estimer d'abord les concentrations totales de Vibrions, puis des deux espèces qui nous intéressent.

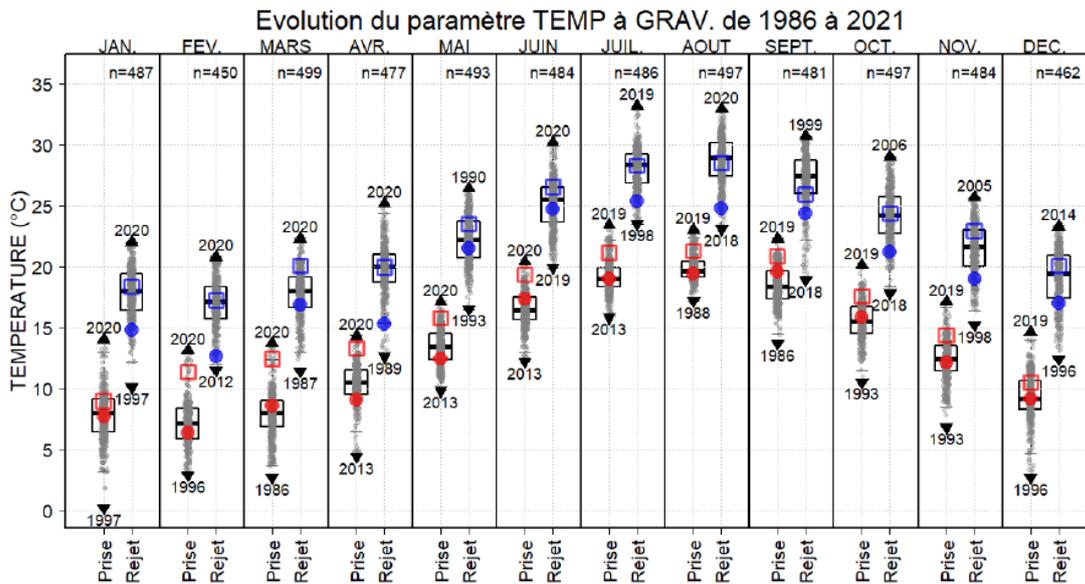


Figure 9 : Evolution de la température de l'eau au point de prise (en rouge) et au point de rejet (en bleu) durant la période 1986-2021 (Ifremer, 2022)

La température médiane de l'eau au point de rejet durant la période estivale (juin-septembre) de 1986 à 2021 était d'environ 28°C (Figure 9).

En faisant une projection sur la courbe du rapport de l'Ifremer à l'aide de la température trouvée, nous pouvons estimer la moyenne haute de la concentration en vibrions totale dans la zone de rejet, afin de maximiser le risque.

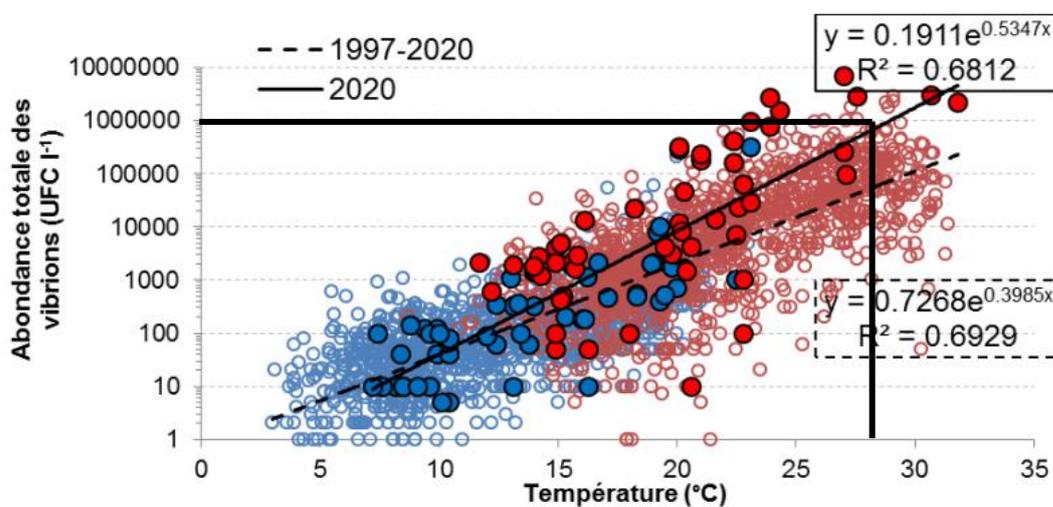


Figure 10 : Projection de la température de l'eau médiane estivale au point de rejet du site de Gravelines pour estimer la moyenne haute de la concentration en Vibrion totale

Ainsi, pour une température médiane de l'eau de 28°C en période estivale, la moyenne haute de la concentration en Vibrions totale peut atteindre 1 000 000 UFC/L, voire plus, mais nous garderons la valeur d'un million, car les échantillons pour lesquels ont été mesurés une concentration plus élevée à cette température sont rares.

Ces informations nous permettent de calculer les concentrations de *V.parahaemolyticus* et *V.vulnificus* dans l'eau au niveau de la zone de rejet, on obtient alors, pour une température de 28°C :

V.parahaemolyticus : 50 000 UFC/L

V.vulnificus : 40 000 UFC/L

Détail des calculs dans l'annexe B.

8.2.1.3 Estimation de la température de l'eau en 2050 et en 2100

Pour estimer la température de l'eau dans la zone de rejet du site en 2050 et en 2100, nous nous servirons d'une étude réalisée dans le nord de la Manche le long des côtes Anglaise, qui estime que la température de la Manche augmente d'environ 0,42°C par décennie en moyenne, depuis 2003 (Kassem et al., 2022). Ainsi, pour calculer la température de l'eau en 2050 et en 2100 nous devons ajouter à la température actuelle de l'eau (28 °C), le 0,42°C de réchauffement estimé par cette étude, multiplié par le nombre de décennie, on obtient ainsi :

- Pour 2050 : 29,3°C
- Pour 2100 : 31,4°C

8.2.1.4 Calcul des concentrations de *V.parahaemolyticus* et *V.vulnificus* dans l'eau en 2050 et en 2100

8.2.1.4.1 Période 2050

En 2050, avec une température de l'eau au point de rejet de 29,3°C, on estime la concentration des deux espèces de vibrion à :

V.parahaemolyticus : 84 700 UFC/L

V.vulnificus : 67 800 UFC/L

8.2.1.4.2 Période 2100

Pour la période 2100 le même calcul pour une température de l'eau estimée à 31,4 °C nous donne les concentrations suivantes :

V.parahaemolyticus : 200 000 UFC/L

V.vulnificus : 160 000 UFC/L

8.2.1.5 Concentration dans l'eau des souches pathogènes

Comme nous l'avons vu dans la partie « Caractérisation des dangers » toutes les souches de *V.parahaemolyticus* ne sont pas pathogènes. Dans son rapport de 2005, la FDA liste certaines études qui se sont intéressées à la proportion de *Vibrio parahaemolyticus* pathogènes (possédant le gène tdh et/ou trh), parmi l'ensemble des souches de l'espèce. Les résultats montrent que la proportion de souches pathogènes n'excède pas 3,2% et semble même en général être inférieure à 1% (FDA, 2005). De ce fait, nous utiliserons la valeur de 3,2% afin d'éviter toute sous-estimation dans le calcul du risque lié à *Vibrio parahaemolyticus*.

Concernant *Vibrio vulnificus*, aucun facteur de pathogénicité ne permet pour l'instant de distinguer correctement les souches pathogènes des non pathogènes (Phillips & Satchell, 2017), ainsi, nous considérerons que toutes les souches sont pathogènes.

8.2.2 Exposition liée à la pratique d'une activité aquatique

Maintenant que nous connaissons les concentrations de *V.vulnificus* et *V.parahaemolyticus* dans la zone de rejet pour chacune des périodes, nous pouvons estimer l'exposition d'un individu lors de la pratique d'une activité aquatique. Pour cela, il faut déterminer le volume moyen d'eau ingéré par un individu durant celle-ci. D'après une étude de Dorevitch et coll. (2011), l'estimation supérieure de la quantité d'eau ingérée lors de loisirs aquatiques est comprise entre 10 et 15 ml (Dorevitch et al., 2011). Nous choisirons donc la valeur de 15 ml pour nos calculs afin de maximiser le risque. Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

Espèces	<i>Vibrio parahaemolyticus</i>			<i>Vibrio vulnificus</i>		
	Aujourd'hui	2050	2100	Aujourd'hui	2050	2100
Température de l'eau (°C)	28	29,3	31,4	28	29,3	31,4
Concentration de vibrions totaux dans l'eau (UFC/L)	50 000	84 700	200 000	40 000	67 800	160 000
Concentration de vibrions pathogènes (UFC/L)	1 600	2 710	6 400	40 000	67 800	160 000
Nombre de vibrions pathogènes pour 15 ml d'eau ingérés lors d'une activité aquatique (UFC)	24	40	96	600	1 000	2 400

Tableau 2 : Résumé global de l'évaluation de l'exposition à *V.parahaemolyticus* et *V.vulnificus* aujourd'hui, en 2050 et en 2100 lors de la pratique d'activité aquatique

8.2.3 Exposition liée à la consommation d'huîtres crûes

Regardons à présent quels sont les risques liés à la consommation d'huîtres crûes. Pour cela, nous considérerons que les huîtres ont été récoltées et consommées par un particulier, car il est compliqué de connaître l'évolution des concentrations en Vibrions de ce produit dans le cadre d'une consommation d'huîtres provenant du supermarché ou d'un restaurant.

Les hypothèses seront les suivantes :

- Huîtres récoltées dans la zone d'influence thermique du rejet du site de Gravelines par un particulier en période estivale
- Temps passé à l'air libre entre la récolte et la mise en réfrigération : 5h
- Temps de réfrigération : 4h
- Les huîtres sont consommées crûes le soir même
- Quantité consommée : Environ 200 grammes de chair d'huître par portion (Valeur utilisée dans l'évaluation des risques liée à la consommation d'huîtres de la FDA (2005), obtenue lors d'une enquête téléphonique) (FDA, 2005)

8.2.3.1 *Vibrio parahaemolyticus*

On commence par estimer la concentration de *V.parahaemolyticus* dans les huîtres en fonction de la température de l'eau. Pour cela, nous utiliserons les données de l'étude de Cook et coll. (2002) qui ont servi dans l'évaluation de la FDA. Cette dernière s'est servie de 3 jeux de données (Tableau 3), qui ont chacun permis d'établir une relation entre la température de l'eau et la concentration de *V.parahaemolyticus* par gramme d'huître.

Study	Region	Number Samples	Method of Isolation	Limit of Detection
DePaola <i>et al.</i> , 1990	Northeast Atlantic Mid-Atlantic Gulf Coast Pacific Northwest	61 ^a	Membrane filtration	10 cfu/g
FDA/ISSC, 2001/ Cook <i>et al.</i> , 2002b	Northeast Atlantic Mid-Atlantic Gulf Coast	624 ^b	Direct plating	10 cfu/g
Washington State Department of Health, 2000; 2001	Pacific Northwest	262 ^c	FDA-BAM (3-tube MPN)	0.3 cfu/g

Tableau 3 : Résumé des jeux de données utilisées par la FDA pour la modélisation de l'effet de la température de l'eau sur les densités totales de *Vibrio parahaemolyticus* dans les huîtres

Le jeu de données de Cook et coll. (2002) est celui basé sur le plus grand nombre d'échantillons et semble être plus le plus représentatif de la Manche car les échantillons ont été prélevés dans le Golfe du Mexique, dans la zone Mid-Atlantique et surtout dans la partie Nord Est de l'Atlantique, qui est la partie de l'Atlantique en contact avec la manche et les autres mers du Nord de l'Europe. Nous utiliserons donc la courbe de régression obtenue à partir des données de l'étude de Cook et coll. (2002) pour déterminer les concentrations en *Vibrio parahaemolyticus* des huîtres au moment de la récolte (Figure 11).

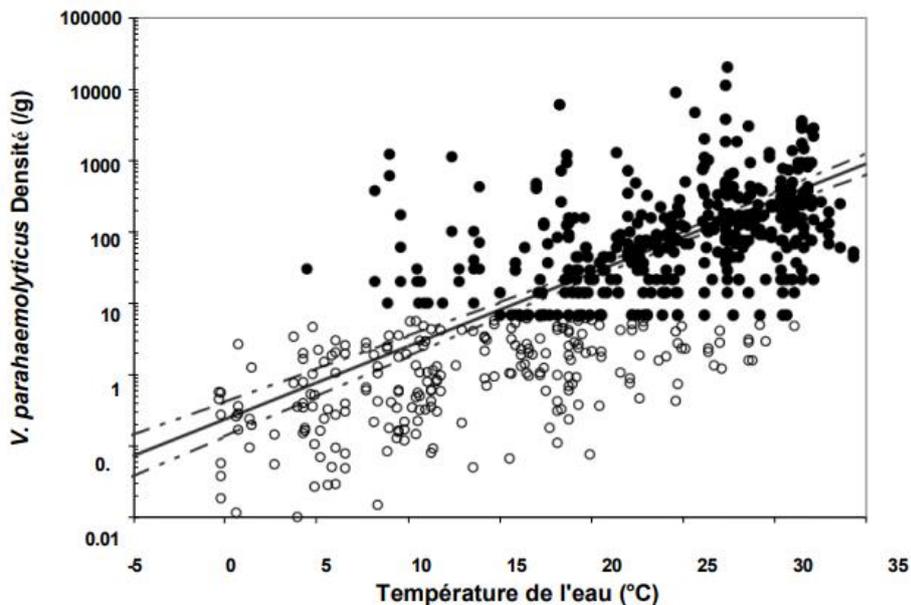


Figure 11 : Relation entre les densités de *Vibrio parahaemolyticus* dans les huîtres et la température de l'eau à l'aide de l'ensemble de données Cook et coll. (2002) (FDA, 2005)

L'équation de la courbe est la suivante :

$$\log_{10} (V. \textit{parahaemolyticus}/g) = \alpha + \beta * WTEMP + \varepsilon$$

Avec WTEMP la température de l'eau, ε la variance, et où :

$$\alpha = -0,63$$

$$\beta = 0,10$$

On obtient ainsi les concentrations suivantes :

Espèces	<i>Vibrio parahaemolyticus</i>		
	Aujourd'hui	2050	2100
Température de l'eau (°C)	28	29,3	31,4
Concentration en <i>V.parahaemolyticus</i> par gramme d'huître (UFC/g)	148	200	330

Tableau 4 : Concentration de *V.parahaemolyticus* par gramme d'huître pour les différentes périodes

Une fois que nous connaissons la concentration en *V.parahaemolyticus* par gramme d'huître en fonction de la température de l'eau, il nous faut connaître l'évolution de la concentration après récolte, jusqu'à la consommation, qui ne dépendra ainsi plus de la température de l'eau, mais de la température de l'air.

8.2.3.1.1 Estimation de la température de l'air

Les températures de l'air, utilisées pour estimer la croissance de *V.parahaemolyticus* post-récolte, seront celles de la période estivale.

La température actuelle moyenne en été dans la ville de Calais, qui se trouve à environ 20 km de la centrale de Gravelines, est comprise entre 14 et 20,5°C avec une moyenne à environ 18°C (Figure 12) (Köppen. & Geiger).

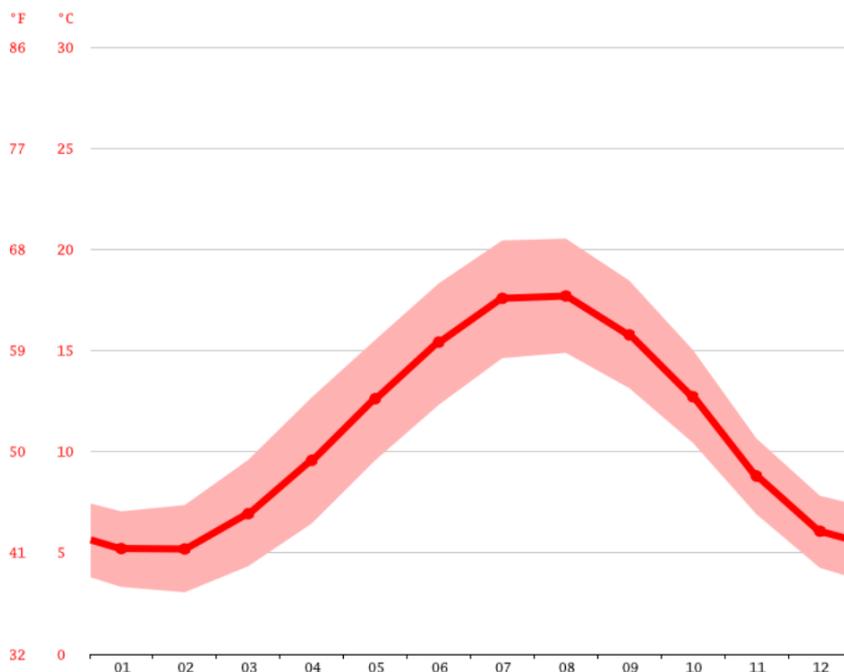


Figure 12 : Courbe des températures moyennes de l'air à Calais au cours de l'année

Nous utiliserons la température moyenne maximale qui correspond à 20,5°C, pour la période actuelle, afin de maximiser le risque.

Ensuite, pour estimer la température de l'air en 2050 et en 2100, nous utiliserons les températures obtenues grâce à l'outil de la Drias, qui permet d'avoir différentes informations concernant le climat en France en fonction de différents modèles et de différents scénarios, pour des périodes allant de 1976-2005 à 2071-2100. Ainsi, nous utiliserons la température de l'air de la période 2021-2050 comme valeur pour l'année 2050, et la température de la période 2071-2100 comme valeur pour l'année 2100. Nous différencierons également les températures du scénario RCP 4.5, de celles du scénario RCP 8.5.

Scénarios RCP	RCP 4.5			RCP 8.5		
	Aujourd'hui	2050	2100	Aujourd'hui	2050	2100
Températures de l'air (°C)	20,5	21,11	22,06	20,5	21,39	23,90

Tableau 5 : Températures estivales de l'air estimées dans la zone de Gravelines actuellement, en 2050 et en 2100 pour les scénarios RCP 4.5 et 8.5 (Annexe A)

Maintenant que nous avons les températures de l'air, nous pouvons calculer le taux de croissance de *V.parahaemolyticus* dans les huîtres à l'air libre, puis en déduire leur concentration après 5h à température ambiante.

8.2.3.1.2 Concentration de *V.parahaemolyticus* dans les huîtres post-récolte

8.2.3.1.2.1 A l'air ambient (5h)

Commençons par calculer le taux de croissance de *V.parahaemolyticus* dans les huîtres lorsque ces dernières sont sorties de l'eau. Dans son évaluation la FDA se base sur deux études pour calculer ce taux de croissance, une première réalisée par Gooch et coll. (2002) dans laquelle le taux de croissance de *V.parahaemolyticus* a été obtenu directement sur des huîtres, mais seulement pour une température de 26°C (Gooch et al., 2002) ; et une deuxième réalisée par Miles et coll. (1997), dans laquelle les taux de croissance ont été obtenus grâce à un bouillon, permettant de construire l'équation ci-dessous (Miles et al., 1997).

$$\sqrt{\mu_m} = \frac{b * (T - T_{min}) * \left[1 - \exp(c * (T - T_{max}))\right] * \sqrt{(a_w - a_{w,min}) * \left[1 - \exp(d * (a_w - a_{w,max}))\right]}}{\sqrt{\ln(10)}}$$

Avec :

μ_m = Taux de croissance maximal (log₁₀ par minute)

a_w = Activité de l'eau

T = Température de l'air (en degré Kelvin)

T_{min} = Température minimale de croissance de *V.parahaemolyticus* (278,5 °K)

T_{max} = Température maximale de croissance de *V.parahaemolyticus* (319,6 °K)

$a_{w,min}$ = Activité de l'eau minimale pour la croissance de *V.parahaemolyticus* (0,921)

$a_{w,max}$ = Activité de l'eau maximale pour la croissance de *V.parahaemolyticus* (0,998)

b = 0,0356

c = 0,34

d = 263,64

En comparant les résultats obtenus à 26°C dans l'étude de Miles et coll. (1997) et de Gooch et coll. (2002), la FDA a pu déterminer un facteur de correction permettant de passer des taux de croissance obtenus sur bouillon aux taux de croissance « réels » trouvés directement dans les huîtres. Ce facteur de correction est de 4, c'est-à-dire que le taux de croissance trouvé grâce à la formule de Miles et coll. (1997) doit être divisé par 4, afin d'obtenir un taux de croissance corrigé.

Ce qui nous donne :

Scénarios RCP	RCP 4.5			RCP 8.5		
	Aujourd'hui	2050	2100	Aujourd'hui	2050	2100
Températures de l'air (°C)	20,5	21,11	22,06	20,5	21,39	23,90
Taux de croissance par heure ($\log_{10}\mu_m$)	0,47	0,51	0,57	0,47	0,53	0,70
Taux de croissance par heure ($\log_{10}\mu_m$) corrigé	0,1175	0,1275	0,1425	0,1175	0,1325	0,175

Tableau 6 : Taux de croissance horaire de *V.parahaemolyticus* dans les huîtres pour chacun des scénarios

Nous pouvons voir que le taux de croissance de *V.parahaemolyticus* augmente avec la température de l'air, ainsi celui-ci est le plus élevé dans le scénario RCP 8.5 et pour la période 2100.

Grâce au taux de croissance nous pouvons à présent calculer la concentration de *V.parahaemolyticus* au bout de 5h passé à l'air libre en utilisant la formule dont s'est servi la FDA pour son évaluation :

$$\log_{10}(N(t)) = \min [\log_{10}(N(0)) + \mu_m * t, A]$$

Avec :

N(t) : Concentration en *Vibrio parahaemolyticus* dans les huîtres, après un temps t à l'air libre

N(0) : Concentration dans les huîtres au moment de la récolte

μ_m : Taux de croissance maximal

t : Temps passé à l'air libre

A : Densité maximale en *Vibrio parahaemolyticus*, estimée à 10^6 par gramme de chair d'huître.

On obtient ainsi :

Scénarios RCP	RCP 4.5			RCP 8.5		
	Aujourd'hui	2050	2100	Aujourd'hui	2050	2100
Concentration en Vibrions par gramme d'huître au moment de la récolte (UFC/g)	148	200	330	148	200	330
Concentration en <i>V.parahaemolyticus</i> par gramme d'huître après 5h à température ambiante (UFC/g)	572	868	1 700	572	973	2 475

Tableau 7 : Evolution des concentrations de *V.parahaemolyticus* dans les huîtres après 5h à température ambiante

On observe que la concentration en *V.parahaemolyticus* dans les huîtres a augmenté après 5h à température ambiante et celle-ci est la plus élevée pour le scénario 8.5 et l'année 2100 avec une concentration d'environ 2 500 UFC/g d'huître.

8.2.3.1.2.2 Au réfrigérateur (4h)

Une fois la récolte terminée les huîtres sont placées pendant 4h au réfrigérateur, pendant ce temps le taux de croissance de *V.parahaemolyticus* va être modifié. Pour l'estimer nous utiliserons encore une fois l'équation de la FDA, qui fait l'hypothèse qu'une fois les huîtres mise à réfrigérer le taux de croissance ne descend pas à zéro directement et qu'il faut un

certain temps avant que la croissance de *V.parahaemolyticus* s'arrête. Ainsi, on considérera que le taux de croissance durant la réfrigération diminue linéairement, avec la formule suivante :

$$\mu_m * \frac{T+1}{2}$$

Avec μ_m le taux de croissance à température ambiante et T le temps de réfrigération.

Les taux de croissance durant la réfrigération sont les suivants :

Scénarios RCP	RCP 4.5			RCP 8.5		
	Aujourd'hui	2050	2100	Aujourd'hui	2050	2100
Taux de croissance durant la période de réfrigération	0,29	0,32	0,37	0,29	0,34	0,44

Tableau 8 : Taux de croissance de *V.parahaemolyticus* dans les huîtres pour une période de réfrigération de 4h

Ainsi, nous pouvons calculer la concentration finale de *V.parahaemolyticus* dans les huîtres en appliquant le taux de croissance moyen calculé pour 4h de réfrigération aux concentrations trouvées dans les huîtres après 5h à l'air libre.

On considère que les huîtres sont consommées directement après réfrigération, de ce fait, la température dans les huîtres n'a pas le temps d'augmenter et la concentration de *V.parahaemolyticus* reste inchangée.

Pour rappel, on considère que 3,2% des souches de *V.parahaemolyticus* sont pathogènes et qu'une portion d'huître correspond à 200 grammes de chair.

Scénarios RCP	RCP 4.5			RCP 8.5		
	Aujourd'hui	2050	2100	Aujourd'hui	2050	2100
Températures (°C)	20,5	21,11	22,06	20,5	21,39	23,90
Concentration en <i>V.parahaemolyticus</i> par gramme d'huître au moment de la récolte (UFC/g)	148	200	330	148	200	330
Concentration en <i>V.parahaemolyticus</i> par gramme d'huître après 5h à température ambiante (UFC/g)	572	868	1 700	572	973	2 475
Concentration en <i>V.parahaemolyticus</i> par gramme d'huître après 4h de réfrigération (UFC/g)	1 115	1 813	4 000	1 115	2 128	6 800
Nombre de <i>V.parahaemolyticus</i> pour une portion de 200 grammes d'huîtres (UFC)	223 000	362 000	800 000	223 000	425 600	1 360 000
Nombre de <i>V.parahaemolyticus</i> pathogène par portion (UFC)	7 136	11 584	25 600	7 136	13 619	43 500

Tableau 9 : Résumé de l'évaluation de l'exposition à *V.parahaemolyticus* aujourd'hui, en 2050 et en 2100 lors de la consommation d'huîtres crûes pour les scénarios RCP 4.5 et 8.5

Comme on pouvait s'y attendre le plus grand nombre de *V.parahaemolyticus* dans les huîtres est retrouvé dans le scénario 8.5 pour l'année 2100 avec un nombre de pathogènes de l'ordre de 43 500 UFC par portion de 200g de chair d'huîtres. Pour comparaison, la plus

grande quantité de *V.parahaemolyticus* pathogènes rencontrée lors de la pratique d'activités aquatiques était d'environ 100 UFC, soit 400 fois moins. Et même en prenant le nombre de souches pathogènes le moins élevé dans une portion d'huître, on obtient 7 000 UFC, c'est-à-dire 70 fois plus.

Nous verrons si cette différence entraîne un risque majeur pour le consommateur dans la partie « Caractérisation des risques ».

8.3 CARACTERISATION DES RISQUES

8.3.1 Risques d'infections lors de la pratique d'activités aquatiques

Espèces	<i>Vibrio parahaemolyticus</i>			<i>Vibrio vulnificus</i>		
	Aujourd'hui	2050	2100	Aujourd'hui	2050	2100
Nombre d'UFC par Litre	50 000	84 700	200 000	40 000	67 800	160 000
Nombre d'UFC pour une ingestion de 15 ml d'eau	750	1 270	3 000	600	1 000	2 400
Proportion d'UFC pathogènes pour 15 ml d'eau	24	40	96	600	1 000	2 400
Probabilité d'infection	$3,93 \times 10^{-7}$	$6,55 \times 10^{-7}$	$1,57 \times 10^{-6}$	$5,06 \times 10^{-8}$	$8,42 \times 10^{-8}$	$2,00 \times 10^{-7}$
Proportion de baignades à risques	1 sur 2 500 000	1 sur 1 500 000	1 sur 640 000	1 sur 20 000 000	1 sur 12 000 000	1 sur 5 000 000

Tableau 10 : Probabilité d'infection par *V.parahaemolyticus* et *V.vulnificus* lors de la pratique d'activités aquatiques dans la zone de rejet de la centrale de Gravelines actuellement, en 2050 et en 2100

Le risque d'infection lors de la pratique d'une activité aquatique semble faible dans chacun des scénarios, que ce soit pour *Vibrio parahaemolyticus* ou *Vibrio vulnificus*. En effet, le risque le plus élevé pour *V.parahaemolyticus* sera d'un cas pour 640 000, dans le scénario 2100, tandis qu'aujourd'hui on est sur un cas pour 2,5 millions. On observe donc une potentielle augmentation de la probabilité d'infection avec la montée des températures de l'eau, mais le risque reste faible, notamment au vu de la faible gravité des infections causées par cette espèce.

Concernant *Vibrio vulnificus*, le risque le plus élevé est également atteint en 2100, avec un cas pour 5 millions, ainsi, même en prenant le pire cas, qui serait que toute contamination par *V.vulnificus* mène à une septicémie, le risque resterait négligeable.

8.3.2 Risques d'infection lors de la consommation d'huîtres crûes

Scénarios RCP	RCP 4.5			RCP 8.5		
	Aujourd'hui i	2050	2100	Aujourd'hui i	2050	2100
Proportion de <i>V.parahaemolyticus</i> pathogène par portion	7 136	11 584	25 600	7 136	13 619	43 500
Probabilité d'infection	$1,17 \times 10^{-4}$	$1,90 \times 10^{-4}$	$4,19 \times 10^{-4}$	$1,17 \times 10^{-4}$	$2,23 \times 10^{-4}$	$7,12 \times 10^{-4}$
Proportion de portion à risque	1 sur 8547	1 sur 5263	1 sur 2386	1 sur 8547	1 sur 4484	1 sur 1404

Tableau 11 : Probabilité d'infection par *V.parahaemolyticus* lors de la consommation d'huîtres crûes récoltées dans la zone de rejet de la centrale de Gravelines selon les scénarios RCP 4.5 et 8.5

Tout d'abord, on peut observer une différence entre le risque de contamination lié à la baignade et celui lié à la consommation d'huître. En effet, là où pour la pratique d'activités aquatiques le risque maximal atteint était de $1,57 \times 10^{-6}$ en 2100, ici le risque monte jusqu'à $7,12 \times 10^{-4}$ en 2100 dans le scénario RCP 8.5 correspond à 3 ordres de grandeur supplémentaires, ce qui nous donne une probabilité d'infection de 1 pour 1404.

Ensuite, si l'on compare à présent l'évolution du risque au fil du temps, on s'aperçoit que celui-ci devient plus important à mesure que les températures augmentent, comme c'est le cas lors d'activités aquatiques, ainsi, la probabilité d'infection lors de la consommation d'huîtres crûes est plus importante en 2100 qu'aujourd'hui et qu'en 2050. De plus, le scénario RCP 8.5, dans lequel les températures de l'air prévues sont les plus élevées, montre une augmentation du risque davantage important.

9 DISCUSSION

Tout au long de cette évaluation, du fait d'un manque de données, d'un manque de moyens et d'un manque de temps, un certain nombre de choix et d'hypothèses ont été fait, entraînant des incertitudes, qui impactent la fiabilité du résultat final. Voici donc une liste qui se veut la plus exhaustive sur les limites et incertitudes que peut comporter cette évaluation :

- Du fait d'un faible nombre, voire de l'absence d'études modélisant l'effet de plusieurs paramètres à la fois (salinité, pH, concentration en matière organique, saturation en oxygène) sur les concentrations de Vibrions dans l'eau, mais aussi dans les fruits de mer, nous n'avons pris en compte que l'effet de la température qui est le paramètre avec l'effet le plus significatif sur la croissance de cette bactérie (C. Baker-Austin et al., 2017).
- Au vu de l'accélération de l'augmentation des températures de la Manche comparé à la période 1985-2003 qui était de 0,28°C par décennie (Kassem et al., 2022), il est possible que la valeur de 0,42°C de réchauffement par décennie utilisée dans cette évaluation devienne sous-estimée dans le futur.
- Les températures prévues dans les scénarios climatiques peuvent ne pas être exactes et revues dans le futur. De plus, les températures envisagées pour ces scénarios sont des moyennes pour la période estivale, ainsi, laisser des huîtres à l'air ambiant lors de fortes chaleurs fera augmenter les concentrations en Vibrions bien plus rapidement que ce qui a été montré dans ce document.
- Dans quelle mesure la modification des aléas climatiques (vague de chaleur, précipitations, etc.) va-t-elle avoir un impact sur d'autres paramètres que la température de l'eau, tels que la salinité, la concentration en matière organique, le pH et autres ?

- Comme mentionné plus tôt dans l'évaluation les données les plus complètes concernant les infections par *Vibrio* sont produites aux Etats-Unis, de ce fait une partie des informations utilisées ici pourrait ne pas être représentative du contexte français.
- Les facteurs d'augmentation de la concentration en vibrion pour chaque degré supplémentaire de l'eau utilisés ont été calculés en prenant en compte les différentes espèces de Vibrions mesurées par l'Ifremer sur le site de Gravelines, de ce fait la valeur du facteur multiplicatif (qui est de 1,5) pourrait être différente si l'on prenait en compte les données d'une seule espèce à la fois pour fabriquer la courbe de concentration en fonction de la température de l'eau qui leur est associée.
- Les valeurs de concentration en *Vibrio* dans l'eau sont obtenues à partir des données de Gravelines, sachant que l'abondance totale en vibrion, ainsi que la proportion de chacune des espèces, diffèrent entre les sites, alors les résultats ne sont valables que pour le site de Gravelines. En effet, sur le site de la centrale du Blayais, par exemple, qui se trouve en Charente-Maritime au bord de l'estuaire de la Gironde, la concentration de l'ensemble des espèces de Vibrions dans l'eau y est plus faible que sur Gravelines (Environ 10 000 à 30 000 UFC/L en période estivale sur le site du Blayais (Ifremer, 2018) contre 1 000 000 UFC/L à Gravelines), cependant la proportion de *V.parahaemolyticus* et *V.vulnificus*, comparé à l'ensemble des espèces de vibrions mesurées, est bien plus élevée avec des pics certaines années à 80-90% de *V.parahaemolyticus* (moyenne entre 2006 et 2016 de 55% sur la station de mesure la plus touchée) et 60% pour *V.vulnificus* (moyenne entre 2006 et 2016 également de 55% sur la station de mesure la plus touchée) (Ifremer, 2018), alors que pour rappel sur le site de Gravelines la concentration moyenne enregistrée sur la période 2007-2015 est de 5% pour *V.parahaemolyticus* et 4% pour *V.vulnificus*.
- La proportion de *V.parahaemolyticus* et de *V.vulnificus*, par rapport à l'ensemble des espèces vibrions, utilisée dans l'évaluation, est une moyenne sur toute l'année, de ce fait, les proportions des différentes espèces de vibrions peuvent différer, durant la période estivale, période propice aux activités récréatives aquatiques.
- La quantité d'eau ingérée est une estimation moyenne qui permet de faciliter les calculs, car la quantité et la fréquence d'ingestion accidentelle d'eau pendant la pratique de loisirs aquatiques diffèrent selon les personnes, l'activité pratiquée, l'âge de la personne, etc. Par exemple, dans son étude, Dorevitch, S et al. (2011), indiquent que les nageurs sont 25 à 50 fois plus susceptibles d'avaloir de l'eau accidentellement que d'autres activités aquatiques à contact limité tel que le canoë kayak ou l'aviron (Dorevitch et al., 2011). Concernant l'âge, les enfants ingèrent en moyenne 47 ml contre 24 pour les adultes (Dorevitch et al., 2011).

- Dans cette évaluation le risque est calculé pour des personnes sans facteur de risque, ainsi, les probabilités de contaminations et d'apparitions de symptômes graves sont sous-estimés pour des populations à risques.

10 CONCLUSION

L'objectif de ce mémoire était tout d'abord d'identifier l'impact du changement climatique sur un certain nombre de risques infectieux. Nous avons pu voir que l'intensification de la fréquence, de l'intensité et de la durée de certains aléas climatiques tels que les vagues de chaleurs, les sécheresses, les fortes précipitations ou encore les inondations, pouvait favoriser le développement d'agents infectieux, et pour certains de leurs vecteurs, rendant les populations touchées encore plus vulnérables. De plus, des régions auparavant relativement épargnées, se retrouvent à faire face à l'émergence, voire réémergence de nouvelles maladies. Cette problématique pourrait également avoir un impact sur EDF et ses activités, principalement sur les infrastructures de production d'électricité tels que les centrales thermiques et barrages hydroélectriques qui utilisent l'eau lors de la production.

Ensuite, nous avons réalisé une évaluation des risques microbiologiques prospective portant sur les espèces *V.parahaemolyticus* et *V.vulnificus*. Le but était d'estimer l'impact du réchauffement des eaux, dû au changement climatique, dans la zone de rejet thermique de la centrale de Gravelines, sur les concentrations, ainsi que sur les risques d'infections de ces deux espèces pour des populations pratiquant des activités aquatiques ou consommant des huîtres crûes récoltées dans la zone d'influence thermique de la centrale. Les résultats montrent premièrement qu'une température plus élevée de l'eau, mais aussi de l'air dans le cas des huîtres, est liée à un risque accru de contamination pour l'individu, du fait de la présence d'une concentration plus élevée de Vibrions. Deuxièmement, le risque lié à la pratique d'une activité aquatique reste toutefois négligeable, même dans une eau réchauffée, tandis que le risque lié à la consommation d'huîtres récoltées dans la zone de rejet, n'est pas négligeable, d'autant plus en période de fortes chaleurs, où là les concentrations de *V.parahaemolyticus* peuvent rapidement augmenter, surtout si celles-ci ne sont pas refroidies dans les premières heures après récolte.

Pour finir, à l'avenir il pourrait être pertinent de faire le même exercice en se concentrant cette fois-ci sur les barrages hydroélectriques qui semblent être des lieux propices au développement d'un bon nombre de pathogènes et de vecteurs, et principalement le

moustique qui avec l'émergence de maladies comme le paludisme et la dengue en France, pourrait à l'avenir devenir un enjeu de santé publique majeur.

11 BIBLIOGRAPHIE

- AFCN. (2019). *Fonctionnement d'une centrale nucléaire*. Retrieved 14/07/2023 from <https://afcn.fgov.be/fr/dossiers-dinformation/centrales-nucleaires-en-belgique/fonctionnement-dune-centrale-nucleaire>
- Akil, L., Ahmad, H. A., & Reddy, R. S. (2014). Effects of climate change on Salmonella infections. *Foodborne Pathog Dis*, 11(12), 974-980. <https://doi.org/10.1089/fpd.2014.1802>
- Amato, E., Riess, M., Thomas-Lopez, D., Linkevicius, M., Pitkänen, T., Wołkowitz, T., Rjabinina, J., Jernberg, C., Hjertqvist, M., MacDonald, E., Antony-Samy, J. K., Dalsgaard Bjerre, K., Salmenlinna, S., Fuursted, K., Hansen, A., & Naseer, U. (2022). Epidemiological and microbiological investigation of a large increase in vibriosis, northern Europe, 2018. *Euro Surveill*, 27(28). <https://doi.org/10.2807/1560-7917.Es.2022.27.28.2101088>
- Anses. (2012a). *Évaluation du risque lié à Vibrio parahaemolyticus lors de la consommation de coquillages vivants*. <https://www.anses.fr/fr/system/files/BIORISK2010sa0301Ra.pdf>
- Anses. (2012b). *Vibrio parahaemolyticus*. <https://www.anses.fr/fr/system/files/MIC2011sa0210FiEN.pdf>
- Anses. (2018). *Fiche de description de danger biologique transmissible par les aliments : Vibrions entéropathogènes : Vibrio parahaemolyticus, Vibrio cholerae non-O1/ non-O139 et Vibrio vulnificus*. <https://www.anses.fr/fr/system/files/BIORISK2016SA0272Fi.pdf>
- Anses. (2021). *Evaluation de la contamination des mollusques bivalves vivants et des produits de la pêche prélevés au stade de la distribution en France par des Vibrio potentiellement entéropathogènes*. https://be.anses.fr/sites/default/files/SSA-003_2021-05-28_Vibrio_Copin_VF_0.pdf
- Araujo, R., Suesdek, L., Da silva, A., & Katz, G. (2015). São Paulo urban heat islands have a higher incidence of dengue than other urban areas. *The Brazilian journal of infectious diseases: an official publication of the Brazilian Society of Infectious Diseases*, 146-155.
- Baker-Austin, C., & Oliver, J. D. (2018). Vibrio vulnificus: new insights into a deadly opportunistic pathogen. *Environ Microbiol*, 20(2), 423-430. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13955>
- Baker-Austin, C., Oliver, J. D., Alam, M., Ali, A., Waldor, M. K., Qadri, F., & Martinez-Urtaza, J. (2018). Vibrio spp. infections. *Nature Reviews Disease Primers*, 4(1), 1-19. <https://doi.org/10.1038/s41572-018-0005-8>
- Baker-Austin, C., Stockley, L., Rangdale, R., & Martinez-Urtaza, J. (2010). Environmental occurrence and clinical impact of Vibrio vulnificus and Vibrio parahaemolyticus: a European perspective. *Environ Microbiol Rep*, 2(1), 7-18. <https://doi.org/10.1111/j.1758-2229.2009.00096.x>
- Baker-Austin, C., Trinanes, J., Gonzalez-Escalona, N., & Martinez-Urtaza, J. (2017). Non-Cholera Vibrios: The Microbial Barometer of Climate Change. *Trends in Microbiology*, 25(1), 76-84. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tim.2016.09.008>
- Baker-Austin, C., Trinanes, J., Gonzalez-Escalona, N., & Martinez-Urtaza, J. (2017). Non-Cholera Vibrios: The Microbial Barometer of Climate Change. *Trends Microbiol*, 25(1), 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2016.09.008>
- BfR. (2022). *Bacterial foodborne Vibrio infections: health risk assessment of the occurrence of Vibrio spp. (non-cholera vibrios) in food*. <https://doi.org/10.17590/20220413-083752>
- Bisharat, N., Cohen, D. I., Harding, R. M., Falush, D., Crook, D. W., Peto, T., & Maiden, M. C. (2005). Hybrid Vibrio vulnificus. *Emerg Infect Dis*, 11(1), 30-35. <https://doi.org/10.3201/eid1101.040440>
- Calow, R. C., Macdonald, A. M., Nicol, A. L., & Robins, N. S. (2010). Ground water security and drought in Africa: linking availability, access, and demand. *Ground Water*, 48(2), 246-256. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00558.x>

- CDC. (2019). *Questions et réponses*. Retrieved 21/08/2023 from <https://www.cdc.gov/vibrio/faq.html>
- CDC. (2022). *Parasites - Trypanosomiase américaine*. Retrieved 18/04/2023 from <https://www.cdc.gov/parasites/chagas/epi.html>
- CDE. (2019). *Hydroélectricité*. Retrieved 15/08/2023 from <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydroelectricite>
- Chang, W., Rukayadi, Y., Nor-Khaizura, M. A. R., M.S, N., Kuan, C. H., T.T.H, M., New, C. Y., Anyi, U., Tan, C., Kwan, S. Y., Nordin, Y., O.S.B, R., & R, S. (2019). Step-wise risk assessment of *Vibrio vulnificus* infection associated with the consumption of cockles. *Food Research*, 3, 587-596. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.3\(5\).102](https://doi.org/10.26656/fr.2017.3(5).102)
- Cheke, R., & al., e. (2015). Effets potentiels des vers et vecteurs plus chauds sur la transmission de l'onchocercose en Afrique de l'Ouest. *The Royal Society*.
Climate change as a threat to health and well-being in Europe: focus on heat and infectious diseases. (2022). EEA.
- CNR. (2021). *Rapport annuel d'activité 2021*. <https://www.pasteur.fr/fr/file/42304/download>
- Coates, S. J., Enbiale, W., Davis, M. D. P., & Andersen, L. K. (2020). The effects of climate change on human health in Africa, a dermatologic perspective: a report from the International Society of Dermatology Climate Change Committee. *International Journal of Dermatology*, 59(3), 265-278. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ijd.14759>
- Cochet, A., Calba, C., Jourdain, F., Grard, G., Durand, G. A., Guinard, A., Noël, H., Paty, M. C., & Franke, F. (2022). Autochthonous dengue in mainland France, 2022: geographical extension and incidence increase. *Euro Surveill*, 27(44). <https://doi.org/10.2807/1560-7917.Es.2022.27.44.2200818>
- Coerd, K. M., & Khachemoune, A. (2021). *Vibrio vulnificus*: Review of Mild to Life-threatening Skin Infections. *Cutis*, 107(2), E12-e17. <https://doi.org/10.12788/cutis.0183>
- Costa, D., Razakandrainibe, R., Valot, S., Vannier, M., Sautour, M., Basmaciyan, L., Gargala, G., Viller, V., Lemeteil, D., Ballet, J. J., Dalle, F., & Favennec, L. (2020). Epidemiology of Cryptosporidiosis in France from 2017 to 2019. *Microorganisms*, 8(9). <https://doi.org/10.3390/microorganisms8091358>
- Dorevitch, S., Panthi, S., Huang, Y., Li, H., Michalek, A. M., Pratap, P., Wroblewski, M., Liu, L., Scheff, P. A., & Li, A. (2011). Water ingestion during water recreation. *Water Res*, 45(5), 2020-2028. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.12.006>
- Dumic, I., & Severnini, E. (2018). "Ticking Bomb": The Impact of Climate Change on the Incidence of Lyme Disease. *Canadian Journal of Infectious Diseases and Medical Microbiology*, 2018, 5719081. <https://doi.org/10.1155/2018/5719081>
- ECDC. (2018). *Mise à jour épidémiologique : saison de transmission du virus du Nil occidental en Europe, 2018*. Retrieved 17/04/2023 from <https://www.ecdc.europa.eu/en/news-events/epidemiological-update-west-nile-virus-transmission-season-europe-2018>
- ECDC. (2022a). *Chikungunya virus disease Annual Epidemiological Report for 2020*. ECDC.
- ECDC. (2022b). *Dengue Annual Epidemiological Report for 2020*. ECDC.
- ECDC. (2023). *Annual Epidemiological Report for 2020 Zika virus disease*. ECDC.
- EDF. *L'aventure EDF - Lumières sur le leader mondial des énergies bas carbone*. Retrieved 10/07/2023 from [https://www.edf.fr/groupe-edf/edf-en-bref/histoire#:~:text=monopole%20d%27Etat,-1946,Gaz%20de%20France%20\(GDF\)](https://www.edf.fr/groupe-edf/edf-en-bref/histoire#:~:text=monopole%20d%27Etat,-1946,Gaz%20de%20France%20(GDF)).
- EDF. *Les différents types de centrales thermiques*. Retrieved 14/07/2023 from <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/les-differents-types-de-centrales-thermiques>
- EDF. (2017). *Le groupe EDF à l'international*.
- EDF. (2022). *Notre mix énergétique* Retrieved 10/07/2023 from <https://www.edf.fr/groupe-edf/produire-une-energie-respectueuse-du-climat>
- EEA. *Climatic Suitability for the Tiger Mosquito - Suitability Index, 1971-2099*. Retrieved 14/04/2023 from <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/indicators/climatic-suitability-for-the-tiger-mosquito-suitability-index-1971-2099>

- EFSA. (2023). *Campylobacter*. Retrieved 17/08/2023 from <https://www.efsa.europa.eu/fr/topics/topic/campylobacter>
- FDA. (2005). *Quantitative Risk Assessment on the Public Health Impact of Pathogenic Vibrio parahaemolyticus in Raw Oysters*. <https://www.fda.gov/food/cfsan-risk-safety-assessments/quantitative-risk-assessment-public-health-impact-pathogenic-vibrio-parahaemolyticus-raw-oysters>
- Froelich, B. A., & Noble, R. T. (2016). Vibrio bacteria in raw oysters: managing risks to human health. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 371(1689). <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0209>
- Géli, P., & Amar, H. P. (2023). Invasion de moustiques : le cauchemar d'un village des Alpes-de-Haute-Provence. *TF1 Info*. <https://www.tf1info.fr/societe/video-alpes-de-haute-provence-envahi-par-les-moustiques-le-village-de-chateau-arnoux-saint-auban-vit-un-cauchemar-chaque-ete-2262601.html>
- Gerace, E., Lo Presti, V. D. M., & Biondo, C. (2019). Cryptosporidium Infection: Epidemiology, Pathogenesis, and Differential Diagnosis. *Eur J Microbiol Immunol (Bp)*, 9(4), 119-123. <https://doi.org/10.1556/1886.2019.00019>
- Ghenem, L., Elhadi, N., Alzahrani, F., & Nishibuchi, M. (2017). Vibrio Parahaemolyticus: A Review on Distribution, Pathogenesis, Virulence Determinants and Epidemiology. *Saudi J Med Med Sci*, 5(2), 93-103. https://doi.org/10.4103/sjmms.sjmms_30_17
- Gooch, J. A., DePaola, A., Bowers, J., & Marshall, D. L. (2002). Growth and survival of Vibrio parahaemolyticus in postharvest American oysters. *J Food Prot*, 65(6), 970-974. <https://doi.org/10.4315/0362-028x-65.6.970>
- Gras, L. M., Smid, J. H., Wagenaar, J. A., Koene, M. G. J., Havelaar, A. H., Friesema, I. H. M., French, N. P., Flemming, C., Galson, J. D., Graziani, C., Busani, L., & Van Pelt, W. (2013). Increased risk for Campylobacter jejuni and C. coli infection of pet origin in dog owners and evidence for genetic association between strains causing infection in humans and their pets. *Epidemiology & Infection*, 141(12), 2526-2535. <https://doi.org/10.1017/S0950268813000356>
- Gubler, D. J., Reiter, P., Ebi, K. L., Yap, W., Nasci, R., & Patz, J. A. (2001). Climate variability and change in the United States: potential impacts on vector- and rodent-borne diseases. *Environmental Health Perspectives*, 109(suppl 2), 223-233. <https://doi.org/doi:10.1289/ehp.109-1240669>
- Haftel, A., & Sharman, T. (2023). Vibrio vulnificus Infection. *StatPearls*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK554404/?report=classic>
- Havelaar, A. H., Kirk, M. D., Torgerson, P. R., Gibb, H. J., Hald, T., Lake, R. J., Praet, N., Bellinger, D. C., de Silva, N. R., Gargouri, N., Speybroeck, N., Cawthorne, A., Mathers, C., Stein, C., Angulo, F. J., & Devleeschauwer, B. (2015). World Health Organization Global Estimates and Regional Comparisons of the Burden of Foodborne Disease in 2010. *PLoS Med*, 12(12), e1001923. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1001923>
- Heng, S. P., Letchumanan, V., Deng, C. Y., Ab Mutalib, N. S., Khan, T. M., Chuah, L. H., Chan, K. G., Goh, B. H., Pusparajah, P., & Lee, L. H. (2017). Vibrio vulnificus: An Environmental and Clinical Burden. *Front Microbiol*, 8, 997. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00997>
- Ifremer. (2017). *Surveillance Écologique et Halieutique - Site de Gravelines*. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00383/49458/49957.pdf>
- Ifremer. (2018). *Surveillance écologique - Site du Blayais*. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00477/58876/61407.pdf>
- Ifremer. (2021). *Surveillance écologique et halieutique du site électronucléaire de Gravelines en 2020*. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00699/81085/>
- Ifremer. (2022). *Surveillance écologique et halieutique du site électronucléaire de Gravelines*.
- Ikiroma, I. A., & Pollock, K. G. (2021). Influence of weather and climate on cryptosporidiosis-A review. *Zoonoses Public Health*, 68(4), 285-298. <https://doi.org/10.1111/zph.12785>
- Irish A, Whitman JD, Clark EH, Marcus R, & C, B. (2002). Mise à jour des estimations et de la cartographie de la prévalence de la maladie de Chagas chez les adultes, États-Unis. *Emerging Infectious Diseases*, 28, 1313-1320.

- IRSN. (2017). *Fonctionnement d'un réacteur nucléaire*. Retrieved 15/08/2023 from <https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/surete/fonctionnement-dun-reacteur-nucleaire>
- Jagai, J. S., Castronovo, D. A., Monchak, J., & Naumova, E. N. (2009). Seasonality of cryptosporidiosis: A meta-analysis approach. *Environ Res*, 109(4), 465-478. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2009.02.008>
- Jones, B. A., Grace, D., Kock, R., Alonso, S., Rushton, J., Said, M. Y., McKeever, D., Mutua, F., Young, J., McDermott, J., & Pfeiffer, D. U. (2013). Zoonosis emergence linked to agricultural intensification and environmental change. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 110(21), 8399-8404. <https://doi.org/10.1073/pnas.1208059110>
- Jones, J. L. (2014). VIBRIO | Introduction, Including *Vibrio parahaemolyticus*, *Vibrio vulnificus*, and Other *Vibrio* Species. In C. A. Batt & M. L. Tortorello (Eds.), *Encyclopedia of Food Microbiology (Second Edition)* (pp. 691-698). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384730-0.00345-1>
- Jones, M. K., & Oliver, J. D. (2009). *Vibrio vulnificus*: disease and pathogenesis. *Infect Immun*, 77(5), 1723-1733. <https://doi.org/10.1128/iai.01046-08>
- Kassem, H., Amos, C. L., & Thompson. (2022). Sea Surface Temperature Trends in the Coastal Zone of Southern England. *Coastal research*, 39(1), 18-31. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-22-00027.1>
- Kibret, S., Lautze, J., McCartney, M., Nhamo, L., & Yan, G. (2019). Malaria around large dams in Africa: effect of environmental and transmission endemicity factors. *Malar J*, 18(1), 303. <https://doi.org/10.1186/s12936-019-2933-5>
- Kibret, S., Lautze, J., McCartney, M., Wilson, G. G., & Nhamo, L. (2015). Malaria impact of large dams in sub-Saharan Africa: maps, estimates and predictions. *Malar J*, 14, 339. <https://doi.org/10.1186/s12936-015-0873-2>
- Kibret, S., Wilson, G. G., Ryder, D., Tekie, H., & Petros, B. (2017). Malaria impact of large dams at different eco-epidemiological settings in Ethiopia. *Trop Med Health*, 45, 4. <https://doi.org/10.1186/s41182-017-0044-y>
- Köppen., & Geiger. *Climat Calais (France)*. Retrieved 09/08/2023 from <https://fr.climate-data.org/europe/france/nord-pas-de-calais/calais-7875/#temperature-graph>
- Kuhn, K. G., Nygård, K. M., Guzman-Herrador, B., Sunde, L. S., Rimhanen-Finne, R., Trönnberg, L., Jepsen, M. R., Ruuhela, R., Wong, W. K., & Ethelberg, S. (2020). *Campylobacter* infections expected to increase due to climate change in Northern Europe. *Sci Rep*, 10(1), 13874. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70593-y>
- Lafferty, K. D. (2009). The ecology of climate change and infectious diseases. *Ecology*, 90(4), 888-900. <https://doi.org/10.1890/08-0079.1>
- Lafferty, K. D., & Mordecai, E. A. (2016). The rise and fall of infectious disease in a warmer world. *F1000Res*, 5. <https://doi.org/10.12688/f1000research.8766.1>
- Lal, A., Baker, M. G., Hales, S., & French, N. P. (2013). Potential effects of global environmental changes on cryptosporidiosis and giardiasis transmission. *Trends in Parasitology*, 29(2), 83-90. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pt.2012.10.005>
- Lau, C. L., Smythe, L. D., Craig, S. B., & Weinstein, P. (2010). Climate change, flooding, urbanisation and leptospirosis: fuelling the fire? *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 104(10), 631-638. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trstmh.2010.07.002>
- Le Roux, F., Wegner, K. M., Baker-Austin, C., Vezzulli, L., Osorio, C. R., Amaro, C., Ritchie, J. M., Defoirdt, T., Destoumieux-Garzón, D., Blokesch, M., Mazel, D., Jacq, A., Cava, F., Gram, L., Wendling, C. C., Strauch, E., Kirschner, A., & Huehn, S. (2015). The emergence of *Vibrio* pathogens in Europe: ecology, evolution, and pathogenesis (Paris, 11-12th March 2015). *Front Microbiol*, 6, 830. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00830>
- Lee, S. H., Chung, B. H., & Lee, W. C. (2013). Retrospective analysis of epidemiological aspects of *Vibrio vulnificus* infections in Korea in 2001-2010. *Jpn J Infect Dis*, 66(4), 331-333. <https://doi.org/10.7883/yoken.66.331>

- Lerer, L. B., & Scudder, T. (1999). Health impacts of large dams. *Environmental Impact Assessment Review*, 19(2), 113-123. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(98\)00041-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0195-9255(98)00041-9)
- Ligon, B. L. (2006). Infectious diseases that pose specific challenges after natural disasters: a review. *Semin Pediatr Infect Dis*, 17(1), 36-45. <https://doi.org/10.1053/j.spid.2006.01.002>
- Lindsey, R. (2022). *Climate Change: Global Sea Level*. Retrieved 11/07/2023 from <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-sea-level>
- Liu, Q., Tan, Z.-M., Sun, J., Hou, Y., Fu, C., & Wu, Z. (2020). Changing rapid weather variability increases influenza epidemic risk in a warming climate. *Environmental Research Letters*, 15(4), 044004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab70bc>
- Majra, J. P., & Gur, A. (2009). Climate change and health: Why should India be concerned? *Indian J Occup Environ Med*, 13(1), 11-16. <https://doi.org/10.4103/0019-5278.50717>
- McCreesh, N., Nikulin, G., & Booth, M. (2015). Predicting the effects of climate change on *Schistosoma mansoni* transmission in eastern Africa. *Parasit Vectors*, 8, 4. <https://doi.org/10.1186/s13071-014-0617-0>
- Miles, D. W., Ross, T., Olley, J., & McMeekin, T. A. (1997). Development and evaluation of a predictive model for the effect of temperature and water activity on the growth rate of *Vibrio parahaemolyticus*. *Int J Food Microbiol*, 38(2-3), 133-142. [https://doi.org/10.1016/s0168-1605\(97\)00100-1](https://doi.org/10.1016/s0168-1605(97)00100-1)
- Mora, C., McKenzie, T., Gaw, I. M., Dean, J. M., von Hammerstein, H., Knudson, T. A., Setter, R. O., Smith, C. Z., Webster, K. M., Patz, J. A., & Franklin, E. C. (2022). Over half of known human pathogenic diseases can be aggravated by climate change. *Nature Climate Change*, 12(9), 869-875. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01426-1>
- Morris, J., & al., e. (2007). *Vibrio vulnificus* infections. Retrieved 21/06/2023 from <https://www.uptodate.com/contents/vibrio-vulnificus-infections#H2>
- N'Goran, E. K., Diabate, S., Utzinger, J., & Sellin, B. (1997). Changes in human schistosomiasis levels after the construction of two large hydroelectric dams in central Côte d'Ivoire. *Bull World Health Organ*, 75(6), 541-545.
- Nexon, E., Sénéquier, A. (2020). *Impact du changement climatique sur l'extension géographique des risques sanitaires*. IRIS. <https://www.iris-france.org/notes/impact-du-changement-climatique-sur-l'extension-geographique-des-risques-sanitaires/>
- Nsuami, M. J., Taylor, S. N., Smith, B. S., & Martin, D. H. (2009). Increases in gonorrhoea among high school students following hurricane Katrina. *Sexually Transmitted Infections*, 85(3), 194-198. <https://doi.org/10.1136/sti.2008.031781>
- Oliver, J. D., & Jones, J. L. (2015). Chapter 66 - *Vibrio parahaemolyticus* and *Vibrio vulnificus*. In Y.-W. Tang, M. Sussman, D. Liu, I. Poxton, & J. Schwartzman (Eds.), *Molecular Medical Microbiology (Second Edition)* (pp. 1169-1186). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397169-2.00066-4>
- OMS. (2017). *Terminologie OMS du paludisme*. <http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/258523/WHO-HTM-GMP-2016.6-fre.pdf?sequence=1>
- OMS. (2022). *Légionellose*. Retrieved 17/08/2023 from <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/legionellosis#:~:text=La%20%C3%A9gionellose%20est%20une%20maladie,et%20dans%20les%20terreux%20contamin%C3%A9s.>
- OMS. (2023a). *Expansion géographique des cas de dengue et de chikungunya au-delà des zones historiques de transmission dans la Région des Amériques*. Retrieved 12/04/2023 from <https://www.who.int/fr/emergencies/disease-outbreak-news/item/2023-DON448>
- OMS. (2023b). *Maladie de Chagas (ou tripanosomiase américaine)*. Retrieved 17/08/2023 from [https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/chagas-disease-\(american-trypanosomiasis\)](https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/chagas-disease-(american-trypanosomiasis))
- OMS. (2023c). *Multi-country outbreak of cholera*.

- Petney, T. N., & Taraschewski, H. (2011). Waterborne Parasitic Diseases: Hydrology, Regional Development, and Control. *Water Chemistry and Microbiology*, 3, 303-366. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53199-5.00061-0>
- Phillips, K. E., & Satchell, K. J. (2017). *Vibrio vulnificus*: From Oyster Colonist to Human Pathogen. *PLoS Pathog*, 13(1), e1006053. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1006053>
- Rajeev, M., Sushmitha, T. J., Aravindraja, C., Toleti, S. R., & Pandian, S. K. (2021). Thermal discharge-induced seawater warming alters richness, community composition and interactions of bacterioplankton assemblages in a coastal ecosystem. *Scientific Reports*, 11(1), 17341. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96969-2>
- RBM. (2017). *Changement climatique et paludisme*. R. Partnership.
- RIVM. (2022). *Risico's van Vibrio-besmetting in zwemwater, schelpdierproductiewater en schelpdieren*. RIVM. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2022-0081.pdf>
- Rouen, C. *Epidémiologie des Cryptosporidioses*. Retrieved 25/08/2023 from <https://cnrcryptosporidioses.chu-rouen.fr/espace-public/les-cryptosporidioses/epidemiologie-crypto/>
- Sheahan, M., Gould, C. A., Neumann, J. E., Kinney, P. L., Hoffmann, S., Fant, C., Wang, X., & Kolian, M. (2022). Examining the Relationship between Climate Change and Vibriosis in the United States: Projected Health and Economic Impacts for the 21st Century. *Environmental Health Perspectives*, 130(8), 087007. <https://doi.org/doi:10.1289/EHP9999a>
- Short, E. E., Caminade, C., & Thomas, B. N. (2017). Climate Change Contribution to the Emergence or Re-Emergence of Parasitic Diseases. *Infectious Diseases: Research and Treatment*, 10, 1178633617732296. <https://doi.org/10.1177/1178633617732296>
- SPF. (2019). *Bilharziose urogénitale*. Retrieved 17/08/2023 from <https://www.santepubliquefrance.fr/maladies-et-traumatismes/maladies-a-transmission-vectorielle/bilharziose-urogenitale/donnees/#tabs>
- SPF. (2022a). *Borréliose de Lyme*. Retrieved 17/08/2023 from <https://www.santepubliquefrance.fr/maladies-et-traumatismes/maladies-a-transmission-vectorielle/borreliose-de-lyme/donnees/#tabs>
- SPF. (2022b). *Légionellose*. Retrieved 25/08/2023 from <https://www.santepubliquefrance.fr/maladies-et-traumatismes/maladies-et-infections-respiratoires/legionellose/la-maladie/#tabs>
- SPF. (2023a). *Chikungunya, dengue et zika - Données de la surveillance renforcée en France métropolitaine en 2022*. Retrieved 12/04/2023 from <https://www.santepubliquefrance.fr/maladies-et-traumatismes/maladies-a-transmission-vectorielle/chikungunya/articles/donnees-en-france-metropolitaine/chikungunya-dengue-et-zika-donnees-de-la-surveillance-renforcee-en-france-metropolitaine-en-2022#:~:text=Du%201er%20mai%20au%2009%20d%C3%A9cembre%202022%2C%20ont%20%C3%A9t%C3%A9,3%20cas%20import%C3%A9%20de%20zika>
- SPF. (2023b). *West nile virus*. Retrieved 25/08/2023 from <https://www.santepubliquefrance.fr/maladies-et-traumatismes/maladies-a-transmission-vectorielle/west-nile-virus/donnees/#tabs>
- SPF. (2023c). *West nile virus*. Retrieved 12/04/2023 from <https://www.santepubliquefrance.fr/maladies-et-traumatismes/maladies-a-transmission-vectorielle/west-nile-virus>
- SPF. (2023d). *West nile virus*. Retrieved 17/04/2023 from [https://www.santepubliquefrance.fr/maladies-et-traumatismes/maladies-a-transmission-vectorielle/west-nile-virus#:~:text=L%27ann%C3%A9e%202018%20a%20%C3%A9t%C3%A9,aux%20Pays%20Bas%20\(2020\).](https://www.santepubliquefrance.fr/maladies-et-traumatismes/maladies-a-transmission-vectorielle/west-nile-virus#:~:text=L%27ann%C3%A9e%202018%20a%20%C3%A9t%C3%A9,aux%20Pays%20Bas%20(2020).)
- Sterk, A., Schijven, J., de Nijs, T., & de Roda Husman, A. M. (2013). Direct and indirect effects of climate change on the risk of infection by water-transmitted pathogens. *Environ Sci Technol*, 47(22), 12648-12660. <https://doi.org/10.1021/es403549s>

- Storck, C. H., Postic, D., Lamaury, I., & Perez, J. M. (2008). Changes in epidemiology of leptospirosis in 2003--2004, a two El Niño Southern Oscillation period, Guadeloupe archipelago, French West Indies. *Epidemiol Infect*, 136(10), 1407-1415. <https://doi.org/10.1017/s0950268807000052>
- Tanser, F. C., Sharp, B., & le Sueur, D. (2003). Potential effect of climate change on malaria transmission in Africa. *Lancet*, 362(9398), 1792-1798. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(03\)14898-2](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(03)14898-2)
- USEPA. (2022a). *Climate Change Indicators: Ocean Heat*. Retrieved 12/07/2023 from <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-ocean-heat>
- USEPA. (2022b). *Climate Change Indicators: Sea Level*. Retrieved 12/07/2023 from <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-sea-level>
- USEPA. (2022c). *Climate Change Indicators: Sea Surface Temperature*. Retrieved 12/07/2023 from <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-sea-surface-temperature>
- USEPA. (2023a). *Climate Change Indicators: Ecosystems*. Retrieved 12/07/2023 from <https://www.epa.gov/climate-indicators/ecosystems>
- USEPA. (2023b). *Climate Change Indicators: Ocean Acidity*. Retrieved 12/07/2023 from <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-ocean-acidity>
- Vezzulli, L., Brettar, I., Pezzati, E., Reid, P. C., Colwell, R. R., Höfle, M. G., & Pruzzo, C. (2012). Long-term effects of ocean warming on the prokaryotic community: evidence from the vibrios. *Isme j*, 6(1), 21-30. <https://doi.org/10.1038/ismej.2011.89>
- Vicaud, A., & Jouen, E. (2015). Adapter les centrales nucléaires au changement climatique. *Revue Générale Nucléaire*. <https://www.sfen.org/rgn/adapter-centrales-nucleaires-changement-climatique/#:~:text=Dans%20un%20circuit%20ouvert%2C%20,MWh%20pour%20un%20circuit%20ferm%C3%A9>.
- Vickery, M. C. L., Nilsson, W. B., Strom, M. S., Nordstrom, J. L., & DePaola, A. (2007). A real-time PCR assay for the rapid determination of 16S rRNA genotype in *Vibrio vulnificus*. *Journal of Microbiological Methods*, 68(2), 376-384. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mimet.2006.02.018>
- Walker, J. (2018). The influence of climate change on waterborne disease and Legionella: a review. *Perspectives in Public Health*, 138(5), 282-286. <https://doi.org/10.1177/1757913918791198>
- WHO, & FAO. (2005a). *Quantitative Risk Assessment on the Public Health Impact of Pathogenic *Vibrio parahaemolyticus* in Raw Oysters*. <https://www.fda.gov/food/cfsan-risk-safety-assessments/quantitative-risk-assessment-public-health-impact-pathogenic-vibrio-parahaemolyticus-raw-oysters>
- WHO, & FAO. (2005b). *Risk Assessment of *Vibrio vulnificus* in raw oysters – Interpretative summary and technical report*. <https://www.who.int/foodsafety/publications/micro/mra8.pdf>
- Wu, R., Trubl, G., Taş, N., & Jansson, J. K. (2022). Permafrost as a potential pathogen reservoir. *One Earth*, 5(4), 351-360. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.03.010>
- Yang, G. J., & Bergquist, R. (2018). Potential Impact of Climate Change on Schistosomiasis: A Global Assessment Attempt. *Trop Med Infect Dis*, 3(4). <https://doi.org/10.3390/tropicalmed3040117>
- Yewhalaw, D., Legesse, W., Van Bortel, W., Gebre-Selassie, S., Kloos, H., Duchateau, L., & Speybroeck, N. (2009). Malaria and water resource development: the case of Gilgel-Gibe hydroelectric dam in Ethiopia. *Malaria Journal*, 8(1), 21. <https://doi.org/10.1186/1475-2875-8-21>
- Zhou, X. N., Yang, G. J., Yang, K., Wang, X. H., Hong, Q. B., Sun, L. P., Malone, J. B., Kristensen, T. K., Bergquist, N. R., & Utzinger, J. (2008). Potential impact of climate change on schistosomiasis transmission in China. *Am J Trop Med Hyg*, 78(2), 188-194.
- Ziegler, A. D., Petney, T. N., Grundy-Warr, C., Andrews, R. H., Baird, I. G., Wasson, R. J., & Sithithaworn, P. (2013). Dams and disease triggers on the lower Mekong river. *PLoS Negl Trop Dis*, 7(6), e2166. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0002166>

12 ANNEXES

12.1 ANNEXE A : CARTES DES TEMPERATURES MOYENNES MAXIMALES FRANÇAISES SELON LA PERIODE ET LE SCENARIO RCP, OBTENUES A PARTIR DES OUTILS DE LA DRIAS

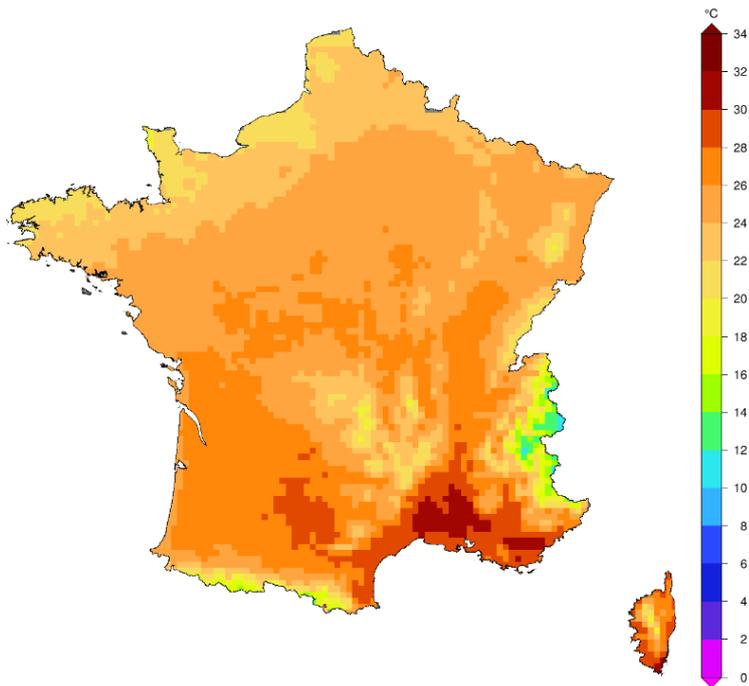


Figure : Températures moyennes maximales française en période estivale pour la période 2021-2050 ; Scénario RCP 4.5

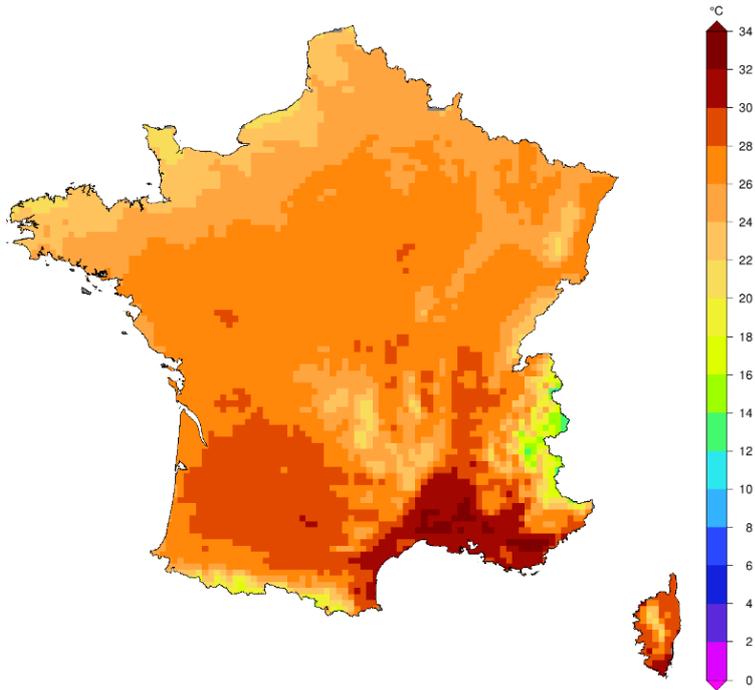


Figure : Températures moyennes maximales française en période estivale pour la période 2071-2100 ; Scénario RCP 4.5

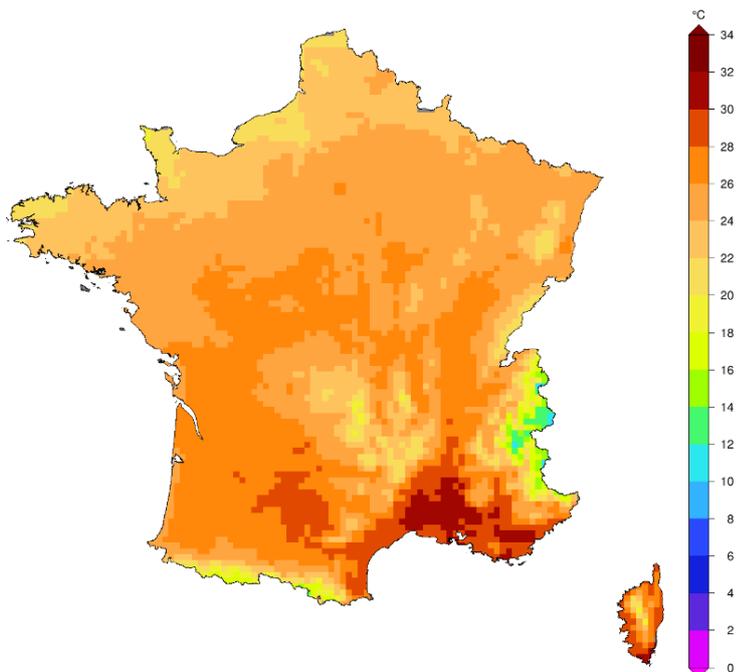


Figure : Températures moyennes maximales française en période estivale pour la période 2021-2050 ; Scénario RCP 8.5

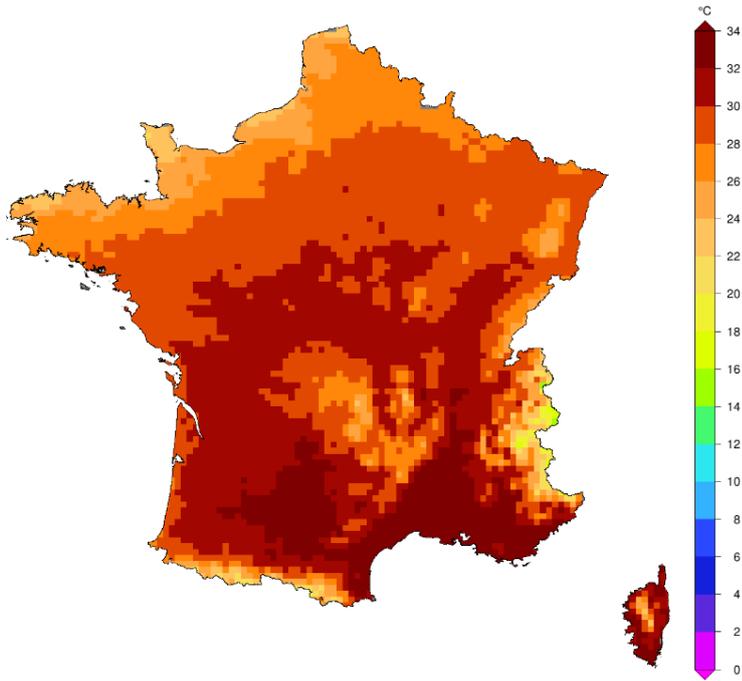


Figure : Températures moyennes maximales française en période estivale pour la période 2071-2100 ; Scénario RCP 8.5

12.2 ANNEXE B : DETAIL DES CALCULS

12.2.1 Calcul du facteur multiplicatif de la relation concentration en Vibrion en fonction de la température de l'eau du rapport de l'Ifremer

En calculant la concentration de vibrions correspondant à deux degrés successifs (ex : 29 et ensuite 30°C) et en divisant les résultats obtenus, on trouve un facteur multiplicatif de la concentration en vibrion pour chaque degré supplémentaire de l'eau.

La valeur de concentration pour une eau à 29°C est de :

$$0.7268e^{(0.3985 \times 29)} = 75917 \text{ UFC/L}$$

La valeur de concentration pour une eau à 30°C est de :

$$0.7268e^{(0.3985 \times 30)} = 113085 \text{ UFC/L}$$

Le calcul du facteur multiplicatif donne :

$$\frac{113085}{75917} = 1,49$$

12.2.2 Calcul de la proportion de *V.parahaemolyticus* et *V.vulnificus* dans l'eau au point de rejet du site de Gravelines

$$\mathbf{V.parahaemolyticus} : 1\ 000\ 000 * 0,05 = 50\ 000 \text{ UFC/L}$$

Ici 1 000 000 correspond à la concentration de l'ensemble des espèces de vibrions mesurées dans la zone, 0,05 représente les 5% de *V.parahaemolyticus* retrouvés dans la zone de rejet sur l'ensemble des espèces de vibrions

$$\mathbf{V.vulnificus} : 1\ 000\ 000 * 0,04 = 40\ 000 \text{ UFC/L}$$

De même pour 0,04 qui est le 4% de *V.vulnificus* dans la zone de rejet sur l'ensemble des espèces de vibrions

12.2.3 Calcul des concentrations de *V.parahaemolyticus* et *V.vulnificus* dans l'eau au point de rejet en 2050 et en 2100

En 2050 :

Le calcul pour 1,3°C supplémentaire donne, pour toutes les espèces de vibrions :

$$1\ 000\ 000 * 1,5^{1,3} = 1\ 694\ 000\ \text{UFC/L}$$

Ici, 1,5 représente le facteur multiplicatif de la concentration en vibrions dans l'eau pour chaque degré supplémentaire et 1,3 représente le nombre de degrés supplémentaire par rapport à la température de référence (28°C).

Ce qui donne pour nos deux espèces :

V.parahaemolyticus : 84 700 UFC/L

V.vulnificus : 67 800 UFC/L

En 2100 :

Le calcul pour 3,4°C supplémentaire donne, pour toutes les espèces de vibrions :

$$1\ 000\ 000 * 1,5^{3,4} = 4\ 000\ 000\ \text{UFC/L}$$

Ce qui donne pour nos deux espèces :

V.parahaemolyticus : 200 000 UFC/L

V.vulnificus : 160 000 UFC/L

13 RESUME

Environ la moitié des maladies infectieuses connues actuellement, sont ou seront impactées par le changement climatique. Les changements dans la fréquence, l'intensité et la durée des aléas climatiques vont favoriser la propagation et le développement de certains pathogènes. Ainsi, les maladies vectorielles et les maladies transmises par contact avec des milieux contaminés, verront leurs nombres de cas augmenter dans le monde du fait d'une modification de leurs aires de répartitions géographiques, d'un allongement de la période de contamination, de meilleures conditions de développement, etc. Cela pourrait avoir un impact sur EDF et ses activités en France et à l'international, tant pour ses travailleurs que pour l'impact de ses activités industrielles sur les riverains.

À la suite de ce constat, nous réalisons une évaluation des risques prospective et comparative sur deux espèces de Vibrions, *Vibrio parahaemolyticus* et *Vibrio vulnificus*. Le développement de ces espèces est favorisé lorsque la température de l'eau augmente. Ainsi, l'objectif est d'estimer l'impact du réchauffement des eaux, dû au changement climatique, dans la zone de rejet thermique de la centrale de Gravelines, sur les concentrations, ainsi que sur les risques d'infections de ces deux espèces, pour des populations pratiquant une activité aquatique ou consommant des huîtres crûes récoltées dans la zone d'influence thermique de la centrale. Les estimations sont faites à partir du scénario RCP 4.5, correspondant à un réchauffement faible, et du scénario RCP 8.5, correspondant au scénario de réchauffement le plus pessimiste, pour l'année 2050 et l'année 2100. Les résultats, de cette évaluation montrent que pour la pratique d'activité aquatique le risque est multiplié par 4 en 2100 pour les deux espèces, comparé à aujourd'hui, toutefois le risque reste très limité. Concernant le risque lié à la consommation d'huîtres crûes récoltées dans la zone d'influence thermique de la centrale, le risque est multiplié par 4 en 2100 pour le scénario RCP 4.5, et par 6 pour le scénario 8.5, mais contrairement à la pratique d'activités aquatiques, la consommation d'huîtres crûes présente un risque bien plus grand, de 2 à 3 ordres de grandeur supplémentaires.

14 ABSTRACT

Around half of all infectious diseases currently known are or will be impacted by climate change. Changes in the frequency, intensity and duration of climatic hazards will favor the spread and development of certain pathogens. Thus, vector-borne diseases and diseases transmitted by contact with contaminated environments will see an increase in the number of cases worldwide, due to a change in their geographical distribution, a lengthening of the contamination period, better development conditions, etc. This could have an impact on EDF and its activities in France and abroad, both for its workers and for the impact of its industrial activities on local residents.

Following this observation, we are carrying out a prospective and comparative risk assessment on two *Vibrio* species, *Vibrio parahaemolyticus* and *Vibrio vulnificus*. The development of these species is favored when water temperature increases. The aim is therefore to estimate the impact of warming water temperatures, due to climate change, in the thermal discharge zone of the Gravelines power plant, on the concentrations and infection risks of these two species for populations practicing aquatic activities or consuming raw oysters harvested in the power plant's thermal influence zone. Estimates are based on the RCP 4.5 scenario, corresponding to low warming, and the RCP 8.5 scenario, corresponding to the most pessimistic warming scenario, for the years 2050 and 2100. The results of this assessment show that, for both species, the risk of aquatic activity is multiplied by 4 in 2100, compared with today, although the risk remains very limited. As for the risk associated with the consumption of raw oysters harvested in the power plant's zone of thermal influence, the risk is multiplied by 4 in 2100 for the RCP 4.5 scenario, and by 6 for the RCP 8.5 scenario, but unlike the practice of aquatic activities, the consumption of raw oysters presents a much greater risk, of 2 to 3 orders of magnitude greater.

15 RESUME POUR LES DECIDEURS

Plus de la moitié des maladies infectieuses connues sont et seront impactées par le changement climatique. Cela se traduit par une modification des aires de répartitions géographiques des agents pathogènes, par un développement plus rapide des pathogènes, ou encore par un allongement de la période de contamination. On peut citer certaines maladies vectorielles, par exemple celles transmises par les moustiques tels que la dengue, le paludisme, le chikungunya ou encore Zika, les maladies transmises par les tiques comme la maladie de Lyme et la fièvre hémorragique de Cimée-Congo. Certaines maladies alimentaires vont également être impactées c'est le cas de la salmonellose, de la vibriose, ou bien de la Campylobactériose.

EDF pourrait être impacté sur ses activités en France et à l'international, tant pour ses travailleurs que pour l'impact de ses activités industrielles sur les riverains.

Afin, de mieux prévenir ces risques liés aux pathogènes, il serait pertinent de prendre en compte l'impact du changement climatique sur ces derniers au moment de l'évaluation d'impact sanitaire des futurs projets de l'entreprise.

Nous avons réalisé une évaluation des risques prospective et comparative entre aujourd'hui, 2050 et 2100 sur le risque lié aux vibrions pathogènes non cholériques au niveau de la tâche thermique de la centrale de Gravelines, pour tenter de déterminer l'augmentation du risque. Nous avons montré qu'un réchauffement des eaux, lié au changement climatique, favorise le développement des espèces *V.parahaemolyticus* et *V.vulnificus*, augmentant ainsi le risque de contamination d'individus exposés à cette eau. En effet, en 2100, le risque d'infection par *V.parahaemolyticus* et *V.vulnificus*, pour un individu pratiquant une activité aquatique dans la zone d'influence thermique de la centrale de Gravelines, pourrait être multiplié par 4. L'évaluation a également montré que la consommation d'huîtres récoltées dans cette même zone présente un risque bien plus important (10 à 100 fois supérieur pour *V.parahaemolyticus*) que les activités aquatiques. De plus, on estime qu'en 2100 le risque d'infection lié à la consommation de ces huîtres pourrait être 4 à 6 fois plus important qu'aujourd'hui. Il est donc important de continuer et compléter la surveillance de ces espèces en ajoutant le suivi des facteurs de virulence, en particulier en période estivale durant lesquelles les concentrations en Vibrions sont les plus élevées. Il pourrait être intéressant de réaliser une surveillance des concentrations de vibrions dans les fruits de mer de la zone.

Afin d'obtenir des données plus précises sur l'évaluation du risque futur lié à Vibrions, et de compléter cette évaluation sur les autres centrales de bord de Manche, il serait important de produire des données sur l'évolution des températures de l'eau et de l'air dans la Manche. Cette étude est d'ailleurs prévue par le service climatique de la R&D d'EDF.

MAUPLLOT

Sulyvan

Septembre 2023

METEORE

Promotion 2023

Impacts des risques microbiologiques liés au changement climatique sur les activités d'EDF

PARTENARIAT UNIVERSITAIRE : Université Rennes

Résumé :

Environ la moitié des maladies infectieuses connues actuellement, sont ou seront impactées par le changement climatique. Les changements dans la fréquence, l'intensité et la durée des aléas climatiques vont favoriser la propagation et le développement de certains pathogènes. Ainsi, les maladies vectorielles et les maladies transmises par contact avec des milieux contaminés, verront leurs nombres de cas augmenter dans le monde du fait d'une modification de leurs aires de répartitions géographiques, d'un allongement de la période de contamination, de meilleures conditions de développement, etc. Cela pourrait avoir un impact sur EDF et ses activités en France et à l'international, tant pour ses travailleurs que pour l'impact de ses activités industrielles sur les riverains.

À la suite de ce constat, nous réalisons une évaluation des risques prospective et comparative sur deux espèces de Vibrions, *Vibrio parahaemolyticus* et *Vibrio vulnificus*. Le développement de ces espèces est favorisé lorsque la température de l'eau augmente. Ainsi, l'objectif est d'estimer l'impact du réchauffement des eaux, dû au changement climatique, dans la zone de rejet thermique de la centrale de Gravelines, sur les concentrations, ainsi que sur les risques d'infections de ces deux espèces, pour des populations pratiquant une activité aquatique ou consommant des huîtres crûes récoltées dans la zone d'influence thermique de la centrale. Les estimations sont faites à partir du scénario RCP 4.5, correspondant à un réchauffement faible, et du scénario RCP 8.5, correspondant au scénario de réchauffement le plus pessimiste, pour l'année 2050 et l'année 2100. Les résultats, de cette évaluation montrent que pour la pratique d'activité aquatique le risque est multiplié par 4 en 2100 pour les deux espèces, comparé à aujourd'hui, toutefois le risque reste très limité. Concernant le risque lié à la consommation d'huîtres crûes récoltées dans la zone d'influence thermique de la centrale, le risque est multiplié par 4 en 2100 pour le scénario RCP 4.5, et par 6 pour le scénario 8.5, mais contrairement à la pratique d'activités aquatiques, la consommation d'huîtres crûes présente un risque bien plus grand, de 2 à 3 ordres de grandeur supplémentaires.

Mots clés :

Changement climatique, Risque microbiologiques, Evaluation des Risques, EDF, *Vibrio parahaemolyticus*, *Vibrio vulnificus*

L'Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les mémoires : ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs.