



**HAL**  
open science

## Réflexions sur l'impact du changement climatique à partir du retour d'expérience des événements sur les installations nucléaires

Michaël Mangeon, Claire Marie Duluc, Richard Launay, Jean-Marie Rousseau

### ► To cite this version:

Michaël Mangeon, Claire Marie Duluc, Richard Launay, Jean-Marie Rousseau. Réflexions sur l'impact du changement climatique à partir du retour d'expérience des événements sur les installations nucléaires. Congrès Lambda Mu 23 - 23ème Congrès Lambda Mu de l'IMdR, IMDR, Oct 2022, Palaiseau, France. hal-03869911

**HAL Id: hal-03869911**

**<https://hal.science/hal-03869911v1>**

Submitted on 24 Nov 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Réflexions sur l'impact du changement climatique à partir du retour d'expérience des événements sur les installations nucléaires

## Reflections on the impact of climate change based on feedback from events at nuclear facilities

MANGEON Michaël

Laboratoire EVS - Environnement Ville  
Société (UMR 5600)

Lyon

michaelmangeon@gmail.com

DULUC Claire-Marie

Institut de Radioprotection et de Sûreté  
Nucléaire (IRSN)

Fontenay-aux-Roses

claire-marie.duluc@irsn.fr

LAUNAY Richard

Commissariat à l'énergie atomique et  
aux énergies alternatives (CEA)

Fontenay-aux-Roses

richard.launay2@cea.fr

ROUSSEAU Jean-Marie

Institut de Radioprotection et de Sûreté  
Nucléaire (IRSN)

Fontenay-aux-Roses

jean-marie.rousseau@irsn.fr

### Résumé —

Cette communication développe une approche exploratoire pour extraire et analyser à partir d'une base de données d'événements significatifs dans le domaine nucléaire, des événements en lien avec la thématique « températures élevées ». Nous proposons une typologie des événements et un exercice d'analyse et de prospective sur 3 événements au regard des changements climatiques. Cette étude a été réalisée avec l'application PIREX, en support d'un groupe de travail sur les changements climatiques du Comité d'orientation des recherches (COR) en sûreté nucléaire et en radioprotection de l'IRSN.

**Mots-clefs — Retour d'expérience, changements climatiques, intelligence artificielle, sûreté nucléaire**

### Abstract—

This paper develops an exploratory approach to extract and analyze from a database of significant events in the nuclear field, events related to the theme "high temperatures". We propose a typology of events and an analysis and prospective exercise on 3 events with regard to climate change. This study was carried out with the PIREX application, in support of a working group on climate change of the IRSN's Nuclear Safety and Radiation Protection Research Policy Committee (COR).

**Keywords — Experience feedback, climate change, artificial intelligence, nuclear safety**

### I. INTRODUCTION

Les changements climatiques impactent les températures de l'air et des cours d'eau, les débits des fleuves mais également l'intensité et la fréquence des aléas extrêmes soulevant des enjeux de production et de sûreté pour les installations nucléaires [1]. En matière de sûreté nucléaire, la place occupée par les aléas hydrométéorologiques est importante. En effet ces événements peuvent entraîner des incidents voire même des accidents. Depuis les années 1960-1970, l'industrie nucléaire bénéficie d'un système déclaratif concernant les événements non désirés qui permet de collecter le retour d'expérience (REX) pour améliorer la sûreté des installations et leur exploitation [2]. Par exemple, en 2021, sur les installations nucléaires de base (INB), l'ASN a répertorié 1172 événements significatifs [3], classés sur l'échelle internationale des événements nucléaires et radiologiques, dite échelle INES, qui hiérarchise les événements nucléaires civils selon leurs risques radiologiques, de 0 (pour un écart) à 7 (pour un accident majeur). A titre illustratif, en 2021, 1068 événements significatifs sur les INB sont classés INES 0, 103 INES 1 (anomalie) et 1 en INES 2 (incident).

Tous ces événements significatifs font l'objet d'une analyse a posteriori menée par l'exploitant et restituée dans un compte rendu d'événement significatif (CRES). Cette analyse a pour objectif d'identifier les causes de ces événements pour identifier et mettre en place les mesures correctives. L'ensemble des CRES est répertorié dans des

bases de données tenues à jour par l'ensemble des acteurs concernés (les exploitants, les autorités de sûreté, l'IRSN).

A l'IRSN, l'application PIREX (plateforme intégrée de retour d'expérience) est dotée de fonctions de « fouille de textes », permettant de traiter l'intégralité des données historisées au fil du temps, constituant un corpus de plus de 45 000 CRES.

Dans le domaine de la recherche, l'IRSN est appuyé par une instance consultative placée auprès de son conseil d'administration : le comité d'orientation des recherches (COR). Cette instance pluraliste est constituée de cinq collègues représentant les différentes parties prenantes de l'Institut (associations, syndicats, élus, État, industriels). Le COR est chargé de conseiller l'Institut en matière d'objectifs et de priorités de recherche dans les champs de la sûreté nucléaire et de la radioprotection. Pour l'exercice de ses missions, le COR peut mettre en place des groupes de travail afin d'explorer une thématique particulière. C'est à ce titre qu'a été créé un groupe de travail sur les changements climatiques (GT COR CC) dans l'objectif d'identifier et prioriser les questions et besoins de connaissances associés aux changements climatiques qui mériteraient d'être pris en compte dans les programmes de recherches de l'Institut. C'est dans le cadre de ce GT COR CC qu'a été réalisée cette étude.

Cette communication développe une approche exploratoire pour extraire et analyser à partir de l'outil PIREX des événements en lien avec la thématique « températures élevées ». Nous proposons une typologie des événements et un exercice d'analyse et de prospective sur 3 événements<sup>1</sup>, au regard des changements climatiques. Pour se faire, notre méthodologie mobilise les outils de traitement automatique du langage naturel (TALN) intégrés dans PIREX [4]. Il s'agit d'algorithmes de fouille de texte (text mining) qui proposent des recherches par mots clés et des fonctions plus élaborées utilisant l'apprentissage supervisé (machine learning) pour indexer automatiquement des documents.

Dans un premier temps, nous présenterons les aspects méthodologiques de cette recherche exploratoire. Dans un second temps, nous analyserons les résultats généraux de cette étude, puis nous proposerons un focus sur 3 événements particuliers en proposant une réflexion prospective sur les changements climatiques. Enfin, dans la partie conclusive, nous présenterons les perspectives de mobilisation et de poursuite de ce travail.

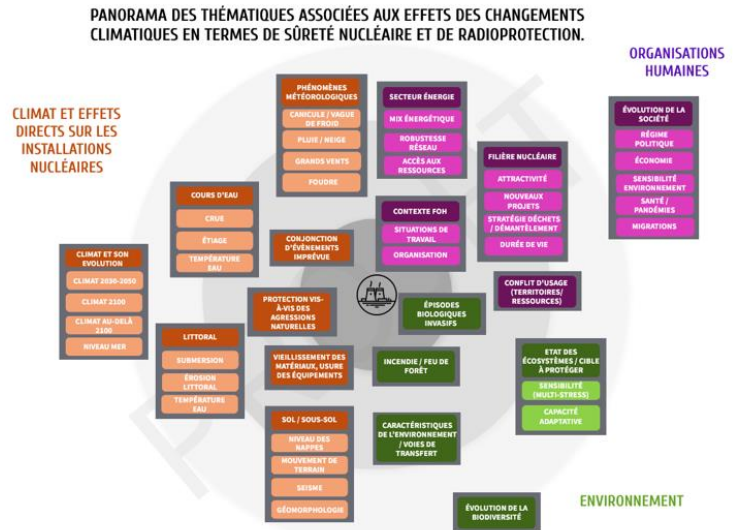
## II. METHODOLOGIE

### A. La définition de thématiques en lien avec les changements climatiques au sein du GT COR CC

La première étape du GT COR CC a été d'établir, à partir d'octobre 2020, un panorama sur l'état des connaissances sur les changements climatiques et leurs impacts, avérés ou potentiels, sur les installations nucléaires. Après plusieurs réunions de travail, une version du panorama a été

stabilisée (Figure 1) afin de consolider, puis d'approfondir certaines thématiques. Les travaux du GT COR CC sont encore en cours et nous ne développerons pas ceux-ci dans cette communication.

Le panorama comprend 3 domaines (1- Climat et effets directs sur les installations nucléaires, 2- Environnement et



3- Organisations humaines). Ces 3 domaines sont déclinés en 18 thématiques et un peu plus de 30 sous-thématiques. Comme nous le verrons dans la partie IV, ces thématiques vont nous servir pour analyser les CRES au regard des changements climatiques.

Figure 1 : Panorama des thématiques associées aux effets des changements climatiques en termes de sûreté nucléaire et de radioprotection, GT COR CC, 2021.

### B. La recherche d'événements d'intérêt avec PIREX

L'application PIREX propose des fonctions de recherche et d'exploration de la base des événements significatifs déclarés par les exploitants nucléaires. Ces fonctions ont été mobilisées pour obtenir une liste de CRES répondant à la thématique « température élevée ». Cette partie revient sur les aspects méthodologiques de notre démarche.

#### 1) La classification automatique dans PIREX

L'outil DIMENSION proposé dans PIREX utilise d'une part, les algorithmes de traitement automatique du langage naturel et d'autre part, des fonctions d'apprentissage supervisé (machine learning). Une « dimension » permet de définir dynamiquement un attribut pour caractériser les événements. Une fois la « dimension » définie et entraînée, elle est projetée sur l'ensemble des événements contenus dans la base. Définir une « dimension » revient donc à créer un index à des fins de classification de l'ensemble de la base des événements.

<sup>1</sup> Nous avons volontairement simplifié et anonymisé les événements et les sites nucléaires impactés.

L'entraînement d'une dimension est réalisé à partir de la constitution de deux collections de CRES : ceux contenant l'objet de recherche et ceux ne le contenant pas. L'algorithme construit un « modèle » à partir des deux collections de référence pour discriminer ce qui est recherché de ce qui ne l'est pas. L'apprentissage est ainsi réalisé par boucles itératives d'entraînements (réussite/échec) [3]. A chaque entraînement l'algorithme calcule un « poids » qui représente la proximité du texte analysé dans le CRES avec le « modèle » de référence. Ainsi, pour chaque événement, un poids compris entre 0 et 1 est attribué pour la dimension. Plus le poids de la dimension est proche de 1 plus la probabilité que l'objet de recherche souhaité soit présent dans le CRES est grande. A contrario, un poids proche de 0 tend à l'exclure. Les valeurs médianes (0,4 – 0,6) témoignent d'une indétermination élevée. Les CRES dont le poids se situe dans cette zone sont alors utilisés pour améliorer l'apprentissage, en les basculant dans la collection de référence positive ou négative après lecture du CRES par l'utilisateur.

Dans le cadre de cette étude exploratoire, il a été envisagé de créer une dimension dont l'objet de recherche portait sur les « températures élevées », thématique d'intérêt pour le GT COR CC.

Nous avons fait le choix de réaliser deux dimensions en parallèle sur le même objet de recherche. L'idée était de pouvoir tester l'homogénéité/hétérogénéité des résultats produits par l'algorithme sur le même sujet, via un apprentissage supervisé par deux utilisateurs différents. Nous faisons l'hypothèse que les nombreux échanges réalisés en amont de ce travail de recherche doivent permettre d'extraire du corpus des CRES relativement similaires et ainsi d'obtenir des résultats plus robustes. L'objectif était également dans cette phase exploratoire d'identifier les biais potentiels d'apprentissage.

## 2) La recherche textuelle dans PIREX

Pour constituer les collections de référence (exemples positifs et exemples négatifs) en lien avec la thématique « températures élevées », deux recherches ont été menées en parallèle. Nous avons fait le choix de mêler des mots clés liés aux vagues de chaleur, canicules mais aussi aux sécheresses hydrologiques. On parle communément de vague de chaleur, voire de canicule, lorsqu'on observe des températures anormalement élevées pendant plusieurs jours consécutifs<sup>2</sup>.

La sécheresse peut être définie comme un déficit anormal en eau dans une ou plusieurs parties du cycle hydrologique terrestre<sup>3</sup>.

La première étape a été d'identifier des CRES répondant à la thématique avec une recherche par mots-clés :

- Pour la recherche de l'utilisateur n°1 : chaleur, chaud, température, canicule, « période d'été », « période de

canicule », « température extrême », soleil, grand chaud, forte température, sécheresse, extrême.

- Pour la recherche de l'utilisateur n°2 : sécheresse, canicule, chaud, température, « tassement de terrain », sol, conflit, étiage, rejet, « nappe phréatique » chaleur, dilatation, thermique, fatigue, aride.

Les résultats obtenus ont permis de créer les collections de référence (positive, négative) pour entraîner les dimensions visées. Après plusieurs entraînements, 115 CRES dans la recherche n°1 et 92 CRES dans la recherche n°2 ont été retenus comme contenant la dimension visée, i.e. ayant trait à des événements impliquant des « températures élevées », avec un poids attribué supérieur à 0,8.

La fusion de ces deux collections a permis de constater qu'elles contenaient 92 CRES en commun et 23 CRES différents. Malgré une recherche par mots clés différente, les résultats obtenus sont donc relativement similaires. Nous revenons sur ce point dans la section suivante.

## C. Présentation et post-traitements des fichiers extraits de PIREX

A partir de PIREX, nous avons exporté dans Excel les données des 115 CRES correspondants à la fusion des résultats des recherches n°1 et n°2. Pour valider nos collections de référence, le premier travail a consisté à lire rapidement l'intégralité des CRES et à identifier ceux en lien avec des aléas hydrométéorologiques et ceux qui ne le sont pas. Ce travail nous a mené à plusieurs constats :

- 52 CRES sur 115 n'ont pas de lien avec les aléas hydrométéorologiques. Il s'agit de CRES répondant à la dimension « températures élevées » mais sans lien avec des épisodes de canicule ou de vague de chaleur, par exemple. La plupart du temps, il s'agit de montée de températures de matériaux et/ou équipements internes au sein d'une installation nucléaire. Une des explications est que le vocabulaire utilisé est non spécifique et peut s'appliquer pour désigner des phénomènes d'élévation de température, quelles qu'en soit l'origine, hydrométéorologique ou autre.
- 63 CRES ont un lien direct ou indirect avec les aléas hydrométéorologiques. Le lien peut être direct (un événement est mentionné dans le CRES) ou indirect (par exemple, le CRES fait mention d'aspects réglementaires en lien avec les températures élevées mais sans être initié par un événement hydrométéorologique).

Nous avons ensuite réalisé un travail de catégorisation sur les CRES en lien avec les aléas hydrométéorologiques, restitué ci-après.

<sup>2</sup> Page internet « Vague de chaleur et canicule, quelle différence ? », Météo-France, consultée le 07\_06\_2022. <https://meteofrance.com/comprendre-la-meteo/temperatures/vague-de-chaleur-et-canicule-quelle-difference>

<sup>3</sup> Page internet « Qu'est-ce que la sécheresse ? | INRAE INSTIT » consultée le 18/05/2022. <https://www.inrae.fr/actualites/quest-ce-que-secheresse>

être associées à un seul CRES, nous y reviendrons dans la section suivante.

#### D. Choix d'une typologie et sélection de CRES d'intérêt

##### 1) Réalisation d'une typologie en fonction de l'arbre des causes des événements

Nous avons réalisé une typologie indicative de chaque CRES en fonction des thématiques/sous thématiques du panorama du GT COR CC. Chaque CRES a fait l'objet d'une analyse notamment à partir de l'arbre des causes réalisé par l'exploitant. Nous avons ajouté des thématiques/sous-thématiques à chaque CRES. Cette étude fait donc appel à un travail d'expertise et présente une part de subjectivité. Les thématiques ont été ajoutées sans préjuger de l'impact de l'événement sur l'environnement et la sûreté. Pour cet exemple (Figure 2), l'état des écosystèmes/cibles à protéger est mentionné car les conditions de rejet fixées par arrêté imposent une adaptation du fonctionnement de l'installation mais cela n'implique pas forcément de conséquence avérée en matière de protection de la nature et de l'environnement.

Exemple d'arbre des causes et liens avec les thématiques du GT COR CC

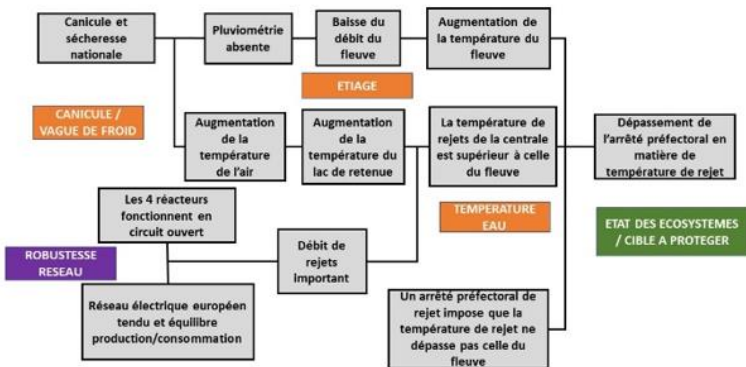


Figure 2 : Exemple d'arbre des causes et liens avec les thématiques du GT COR CC

##### 2) CRES d'intérêt retenus pour une analyse approfondie

Nous avons réalisé une analyse plus spécifique de 3 CRES en lien avec des aléas hydrométéorologiques de type « températures élevées » pour lesquels nous avons débuté une analyse sur les conséquences des changements climatiques sur certains paramètres de ces CRES. L'idée est de pouvoir formuler une réflexion exploratoire (à ce stade sans projection quantitative plus poussée) à proposer aux membres du GT COR CC et aux experts de l'IRSN. Ces 3 CRES ont été retenus en raison des liens possibles avec les changements climatiques.

Nous reviendrons sur ces CRES dans la partie IV.

### III. RESULTATS GENERAUX

#### A. Typologie des événements

Dans un premier temps, nous avons classé les 63 CRES retenus pour leur lien avec des aléas hydrométéorologiques sur la dimension « température élevée » en fonction des thématiques du panorama réalisé dans le cadre des travaux du GT COR CC (Figure 3). Plusieurs thématiques peuvent

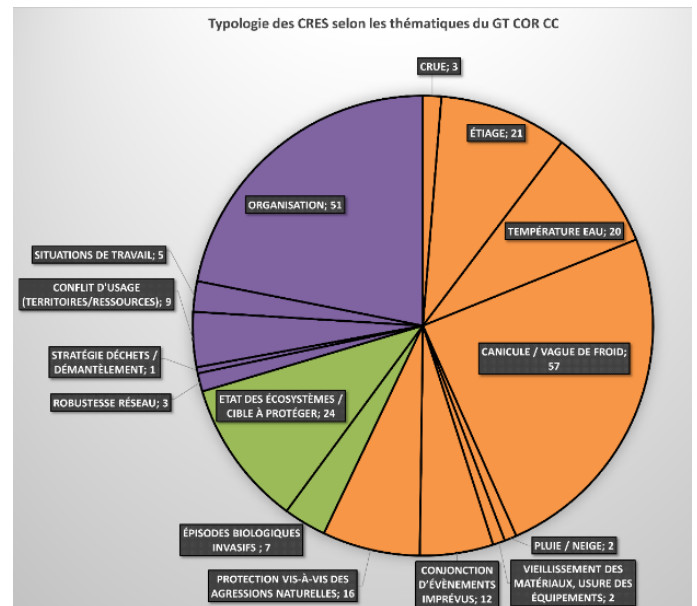


Figure 3 : Typologie des CRES identifiés lors de la recherche « Température chaude » en fonction des thématiques du GT COR CC

Nous tirons plusieurs enseignements de cette typologie :

La thématique « canicule/vague de froid » est la plus représentée dans les CRES avec 57 CRES sur les 63 de notre base d'événements. Ce constat n'est pas étonnant car la grande majorité des CRES mentionne un lien avec les périodes de canicules et/ou de fortes chaleurs. Les quelques CRES qui sortent de ces catégories sont liés à des thématiques d'étiages et/ou de présence de métaux dans les rejets liés à des périodes d'étiage sans mention de canicule et/ou de fortes chaleurs.

Pour la thématique « organisation », elle est également très présente dans les CRES (51 sur 63). Les exploitants l'identifient selon plusieurs critères (défaillance humaine, aspect réglementaire, problème de coordination ou d'organisation, non prise en compte du REX...). Ce constat n'est pas étonnant car on retrouve des causes liées aux facteurs humains et organisationnels dans la plupart des incidents et accidents nucléaires [1].

Les thématiques températures de l'eau, étiages et état des écosystèmes/cible à protéger sont fortement imbriquées. Elles révèlent des épisodes en lien avec un dépassement de la température de rejet autorisée par la réglementation, pouvant entraîner des conséquences sur l'environnement. Plusieurs CRES de ce type sont en lien avec la canicule de 2003. Nous y reviendrons dans la section suivante.

La thématique « conflit d'usage » (territoire / ressources) apparaît 9 fois. Elle est à chaque fois corrélée à des difficultés de coordination / communication entre les exploitants d'ouvrages hydrauliques/hydroélectriques et les exploitants de centrales nucléaires. De nombreux

événements de ce type se déroulent en 2003. Ils sont quasiment absents ensuite, ce qui témoigne, comme l'indiquent les CRES, de la mise à jour de convention entre les différents exploitants, consécutive de ces événements.

La thématique « robustesse réseau » apparaît seulement 3 fois. Elle est mentionnée quand le CRES exprime des difficultés sur le réseau électrique et/ou des formes de conflit entre besoin d'alimentation et enjeux de sûreté/protection de l'environnement.

On constate l'apparition d'autres thématiques mais sur un nombre réduit de CRES (pluies, crue, situations de travail, stratégie de démantèlement, vieillissement des matériaux/usures des équipements...).

Enfin, la thématique « conjonction d'événements imprévus » apparaît 12 fois. Nous l'avons mentionné quand le nombre de thématiques était supérieur à 5 ou 6 occurrences et en fonction de l'analyse des causes réalisée par l'exploitant.

### B. Des CRES au cœur de conjonctions d'aléas

Il apparaît intéressant de s'arrêter sur le nombre de thématiques identifiées pour chaque CRES (Figure 4).

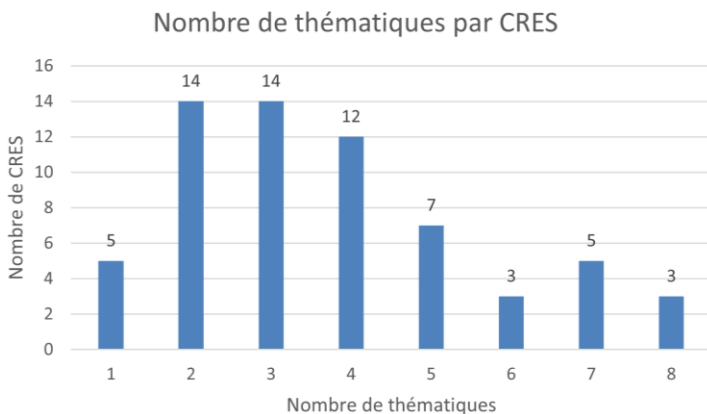


Figure 4 : Nombre de thématiques par CRES

Nous pouvons en tirer les enseignements suivants :

La grande majorité des événements (58 sur 63) sont à l'interface de plusieurs thématiques ;

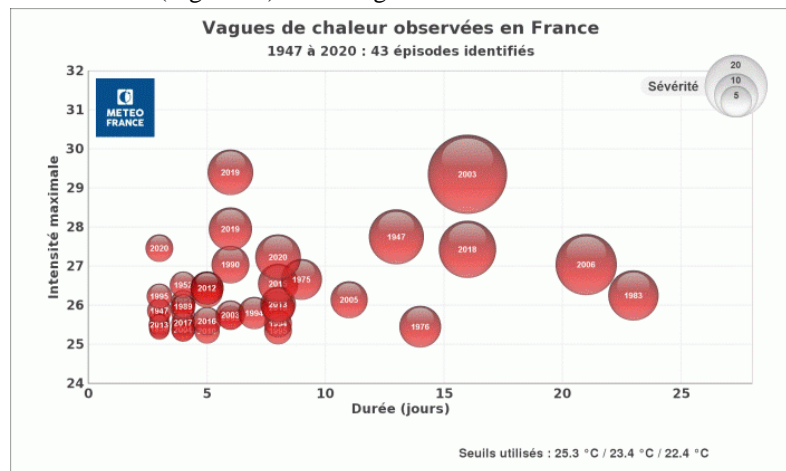
Les CRES contenant 2, 3 ou 4 thématiques sont majoritaires (40 sur 63) ;

Les CRES contenant 5 thématiques et plus ne sont pas rares (18 sur 63) ;

En analysant plus finement les assemblages de thématiques, nous observons que 24 des 63 CRES ont des combinaisons de thématiques liées à des aléas hydrométéorologiques. Le plus souvent, on retrouve des combinaisons de type « canicule/vague de froid + étiages + températures de l'eau »

### C. Le lien entre événements hydrométéorologiques, saisons et CRES

La majorité des événements de notre base de données est liée à des épisodes de vague de chaleur et/ou de canicule connus et répertoriés (2003, 2006 et 2019) par Météo-France (Figure 5) mais également à des sécheresses



hydrologiques (2003 et 2011 notamment).

Figure 5 : Vagues de chaleur observées en France de 1947 à 2020, Météo-France

Nous pouvons voir sur la Figure 6, une répartition des CRES en fonction des années et saisons. On retrouve :

18 événements en lien avec la période caniculaire (août 2003) et la sécheresse hydrologique de 2003, dont 3 survenant en automne, postérieurement à la vague de chaleur ;

4 événements se déroulant en été 2006, en lien avec la canicule de 2006 ;

2 événements se produisant au printemps 2011, en lien avec la sécheresse hydrologique de 2011 ;

8 événements se déroulant en été 2019, en lien avec la canicule de 2019.

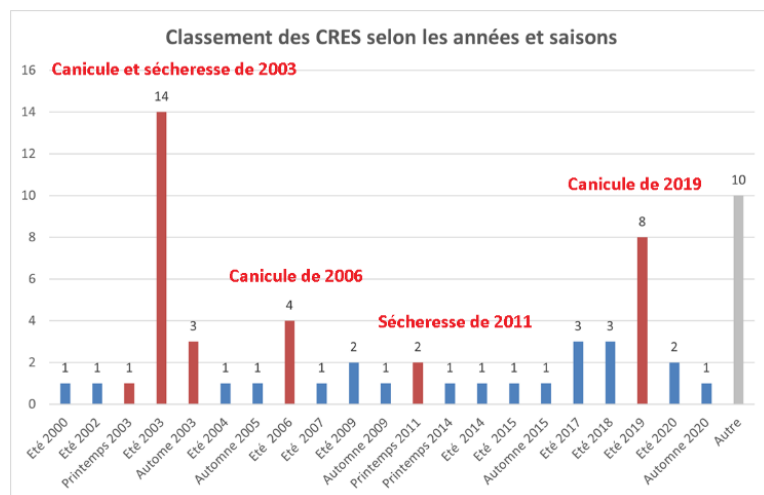


Figure 6 : Classement des CRES selon les années et saisons

Il est à noter que l'on retrouve des événements hors des périodes caniculaires majeures mais en lien avec des épisodes chauds presque à chaque été. On observe

également deux épisodes de colmatage (biologique) de la source froide en 2003 et 2009 qui sont liés à la combinaison entre sécheresse/vague de chaleur l'été et précipitations/crue en décembre. Des CRES liés à des étiages en automne sont également visibles.

Enfin, 10 événements, relatifs à la thématique des températures élevées, n'ont pas de lien direct avec un événement en particulier. Il s'agit de CRES mentionnant par exemple des aspects réglementaires liés aux fortes chaleurs mais sans lien avec l'un des épisodes majeurs répertoriés et mentionnés précédemment.

#### IV. ANALYSE DE 3 EVENEMENTS AU REGARD DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Nous avons réalisé une étude plus spécifique de trois événements pour lesquels nous avons esquissé une analyse sur les conséquences des changements climatiques sur certains paramètres. L'idée est de pouvoir formuler une réflexion exploratoire (à ce stade sans projections quantitatives plus poussées) à proposer aux membres du GT COR CC et aux experts de l'IRSN. Ces trois CRES ont été retenus en raison des évolutions possibles de certains de leurs paramètres avec les changements climatiques. Nous avons également tenté de retenir des événements ayant des causes et des conséquences variées pour proposer un panel de CRES touchant à différents paramètres liés aux changements climatiques.

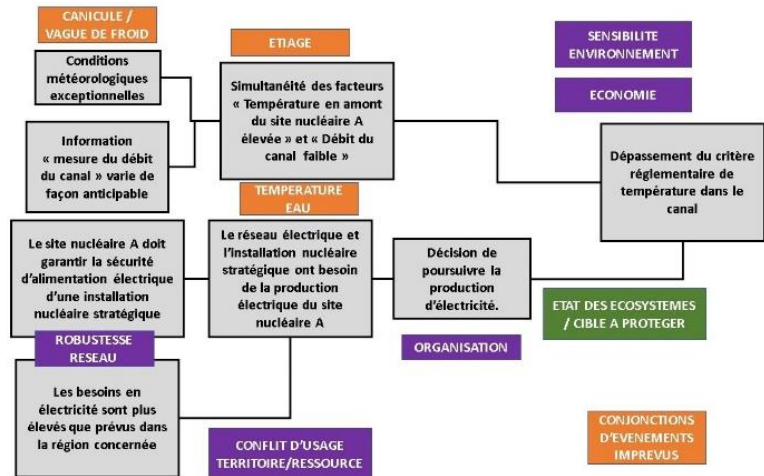
##### A. CRES : Température de rejet (Site nucléaire A)

###### 1) Déroulé de l'évènement et conséquences

Sur le site nucléaire A, à la suite des températures exceptionnelles liées à la canicule de 2003, le site est contraint d'ajuster sa production électrique afin de respecter la valeur limite applicable aux rejets thermiques (température moyenne journalière du canal en aval après mélange) qui est fixé par les arrêtés d'autorisation de fonctionnement de l'installation encadrant les conditions de rejet et de prélèvement d'eau. Le tout est réalisé en maintenant la production minimum tout en garantissant la sûreté d'une autre installation nucléaire à proximité, ainsi que la sécurité du réseau électrique d'une partie de la France. On observe toutefois le dépassement à plusieurs reprises de la valeur limite au cours de cette période de fortes chaleurs et de sécheresse exceptionnelle. Ces dépassements de faible durée sont liés aux variations rapides de débit et de température du canal non anticipables par l'exploitant. Le gestionnaire d'ouvrage hydroélectrique à proximité est en effet amené à faire chuter le débit du canal, sans préavis. La conséquence réelle est une température maximale mesurée en aval du site, restant voisine de la température autorisée. Les premiers résultats des contrôles montrent que les dépassements de températures observés n'ont pas eu d'incidences notables sur l'environnement. En vue d'évaluer les conséquences potentielles, un dispositif de surveillance de l'évolution des paramètres physico-chimiques en aval du site est mis en place.

Si nous reprenons l'arbre des causes réalisé par l'exploitant, nous pouvons positionner des thématiques et

sous-thématiques issues des travaux sur le panorama du GT COR CC. Nous avons positionné 10 thématiques ou sous-thématiques sur l'enchaînement causal de cet évènement (Figure 7). Nous avons ajouté les thématiques « sensibilité environnement » et « économie » car nous pensons qu'elles



sont utiles à la réflexion.

Figure 7 : Arbre des causes simplifié et rapports aux thématiques changements climatiques du CRES Température de rejets (Site nucléaire A)

###### 2) Réflexion prospective sur l'évènement au regard des changements climatiques

Nous pouvons alors repérer une série de paramètres qui semblent importants à analyser dans le cadre d'une réflexion sur les impacts possibles des changements climatiques sur un évènement de ce type :

La canicule de 2003 et la sécheresse hydrologique associée ont été particulièrement importantes en France, notamment dans le Sud-Est. Les travaux récents du GIEC [5] (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), le rapport DRIAS 2020 de Météo-France [6] et les travaux de RTE sur les scénarios énergétiques à 2050 [7] pointent une évolution à la hausse des canicules et sécheresses hydrologiques (évolution à la hausse des étiages et températures de l'eau notamment) entraînant une hausse (modérée) des indisponibilités des centrales nucléaires ;

La situation nécessite des arbitrages entre les divers usages de la ressource en eau, ce qui peut être associée à la thématique « conflit d'usage », avec une situation de tension sur la ressource entre l'exploitant d'ouvrages hydroélectriques et l'exploitant du site nucléaire A et des difficultés d'organisation (lâcher d'eau non anticipable par le site nucléaire). Ces situations peuvent se renouveler dans des situations de sécheresses hydrologiques ;

Pendant cette canicule, la demande électrique est plus importante que prévue dans le sud-est de la France depuis début juillet. A plusieurs reprises, le gestionnaire du réseau électrique (RTE) est intervenu pour demander le maintien de la production électrique du site nucléaire A. Cette situation de tension entre exigences de sûreté/protection de l'environnement et de production pourrait se reproduire

avec les effets des changements climatiques et notamment, les effets combinés, de l'élévation des températures des cours d'eau et la baisse de leur débit et d'une consommation électrique qui va devenir de plus en plus importante en été ;

Un autre paramètre intéressant mentionné dans le CRES relève du besoin en électricité d'une installation nucléaire adjacente, à caractère stratégique, au site nucléaire A. Cet événement illustre les tensions possibles entre la sécurité d'approvisionnement de sites stratégiques et les enjeux de sûreté/protection de l'environnement ;

Cet événement pose également, indirectement, des questions liées à la sensibilité environnementale de la société et à l'économie. Si la sûreté et la protection de l'environnement est une priorité pour l'industriel, les aspects économiques dans ce type de situation peuvent entrer en ligne compte, notamment quand la situation peut engendrer des tensions au niveau du réseau électrique. En ce sens, la décision d'accorder une dérogation à l'exploitant sur les valeurs limites applicables aux rejets thermiques peut être influencée par cette situation de tension sur le réseau. Ce type de décision impliquant sûreté et enjeux de production, pourrait se reproduire plus fréquemment avec les changements climatiques. De plus, l'image perçue de ce type de décision est fortement dépendante de la sensibilité environnementale de la société et de la situation de crise énergétique.

Cet événement est intéressant car il illustre les tensions possibles entre le besoin de sécurité du réseau électrique et de sites stratégiques et les enjeux de sûreté/protection de l'environnement lors d'un épisode de canicule et de sécheresse hydrologique. Dans ce type de situation, il apparaît évident que la sécurité du réseau doit être assurée et que des contraintes (sûreté et/ou protection de l'environnement) peuvent être temporairement relaxées, dans notre cas, par des dérogations de l'autorité de sûreté sur les températures de rejet. Dans ce type de situation qui pourrait devenir plus fréquente avec les changements climatiques, le rôle des autorités de sûreté et de l'expert public peut apparaître complexe, lorsque les enjeux industriels et économiques prennent de l'importance.

## B. CRES : Rejets d'effluents radioactifs (Site nucléaire B).

### 1) Déroulé de l'évènement et conséquences

Lors de la canicule de 2003, sur le site nucléaire B, un réacteur est en arrêt normal sur les générateurs de vapeur (dit « AN/GV »). On note un rejet incontrôlé d'effluents radioactifs dans le fleuve consécutif à l'inétanchéité d'un échangeur RRI<sup>4</sup> lors de sa remise en service après nettoyage. La fuite provient d'une plaque d'un échangeur RRI/SEC qui est alors changée par la seule plaque neuve encore en stock. La tenue des plaques d'échangeurs RRI est assujettie à la corrosion et l'érosion. La canicule a généré une surconsommation de plaques d'échangeurs RRI/SEC

(14 supplémentaires par rapport à la même période en 2002). Contrairement aux réacteurs 3 et 4, les plaques d'échangeurs RRI/SEC des réacteurs 1 et 2 sont d'un type plus ancien, soumises elles aussi à des difficultés d'approvisionnement. Une nouvelle fuite est détectée. A l'ouverture de l'échangeur, celui-ci est trouvé propre et une expertise des plaques est réalisée. La plaque 284 est constatée percée et est remplacée par la plaque 283 déposée précédemment (il n'y a plus de plaque neuve).

Les conséquences réelles sont le déversement dans le fleuve de 98 litres d'eau tritiée à 440 Bq/l. Il y a donc des rejets avérés sur l'environnement sans conséquence significative.

Potentiellement, en cas de perte de la source froide RRI/SEC voie A, la voie B aurait été mise en service de manière continue ce qui aurait conduit à déverser dans le fleuve des effluents tritiés à 440 Bq/l à un débit continu de 40 l/h.

Si nous reprenons l'arbre des causes réalisé par l'exploitant, nous pouvons positionner des thématiques ou sous-thématiques issues des travaux sur le panorama du GT COR CC. Nous avons positionné 6 de ces thématiques sur l'enchaînement causal de cet évènement (Figure 8).

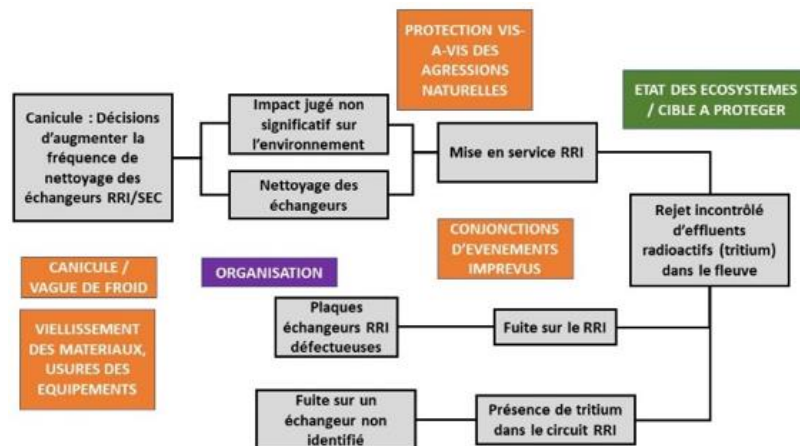


Figure 8 : Arbre des causes simplifié et rapports aux thématiques changements climatiques du CRES rejets d'effluents radioactifs (Site nucléaire B)

### 2) Réflexion prospective sur l'évènement au regard des changements climatiques

Nous pouvons alors repérer une série de paramètres qui semblent importants à analyser dans le cadre d'une réflexion sur les impacts possibles des changements climatiques sur un évènement de ce type :

Nous sommes au cœur de la canicule de l'été 2003. En raison de la situation météorologique exceptionnelle et pour garantir la sûreté de l'installation et la sécurité du réseau électrique, le site nucléaire B renforce la surveillance de la source froide et engage l'anticipation du nettoyage des échangeurs RRI/SEC. La situation de canicule (associée à un faible débit du fleuve) conduit à un

<sup>4</sup> Le circuit de réfrigération intermédiaire (RRI) assure le refroidissement d'un certain nombre d'équipements importants pour la sûreté du réacteur.



nettoyage fréquent des échangeurs. Les travaux récents du GIEC [8], le rapport DRIAS 2020 [6] et les travaux de RTE [7] sur les scénarios énergétiques à 2050 pointent une évolution à la hausse des canicules et sécheresses hydrologiques (étiages notamment) ;

Nous sommes dans une situation d'usure accélérée des équipements (plaque RRI) en lien avec la canicule qui génère une surconsommation de ces équipements. On peut donc faire l'hypothèse que cet évènement se reproduira dans le futur et il est également envisageable que des difficultés d'approvisionnements et/ou de logistique viennent aggraver la situation.

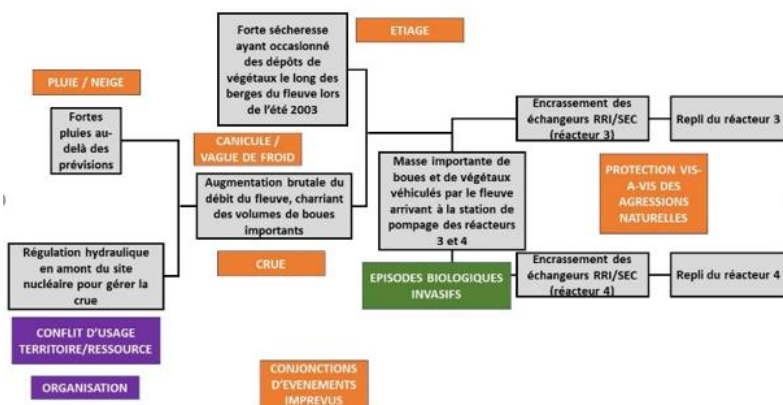
Cet évènement est particulièrement intéressant car il pointe le phénomène de surconsommation d'équipement (ici des plaques d'échangeurs RRI), lié à une situation de canicule. L'évènement questionne donc la capacité d'un site industriel à gérer des situations de maintenance de matériels et d'équipements en conditions météorologiques extrêmes notamment au regard de tensions possibles sur l'approvisionnement en pièces de rechange (pénurie de métaux, difficultés logistiques, hausse des prix...)

### C. CRES : Passage en état de repli des réacteurs 3 et 4 (Site nucléaire C)

#### 1) Déroulé de l'évènement et conséquences

En décembre 2003, sur le site nucléaire C, les brutales intempéries ont provoqué une variation importante du débit du fleuve, ce qui, associée à la sécheresse et la canicule de l'été 2003 (dépôt de végétaux le long des berges) et au lâcher d'eau par un exploitant d'ouvrage hydroélectrique, a conduit à l'encrassement rapide des échangeurs RRI/SEC<sup>5</sup> en lien avec des arrivées de boues et de débris végétaux. On note le passage en état de repli<sup>6</sup> des réacteurs n° 3 et 4. Les conséquences potentielles de cet évènement seraient la perte totale de la source froide (RRI/SEC).

Si nous reprenons l'arbre des causes réalisé par l'exploitant, nous pouvons positionner des thématiques ou sous-thématiques issues des travaux sur le panorama du GT COR CC. Nous avons positionné 8 de ces thématiques sur l'enchaînement causal de cet évènement



<sup>5</sup> Le circuit d'eau brute secouru (SEC) assure le refroidissement du RRI au moyen de la source froide.

Figure 9 : Arbre des causes simplifié et rapports aux thématiques changements climatiques du CRES passage en état de replis réacteurs 3 et 4 (Site nucléaire C)

#### 2) Réflexion prospective sur l'évènement au regard des changements climatiques

Nous pouvons alors repérer une série de paramètres qui semblent importants à analyser dans le cadre d'une réflexion sur les impacts possibles des changements climatiques sur un évènement de ce type :

La canicule de 2003 et la sécheresse hydrologique associée ont occasionné des dépôts importants de végétaux le long des berges. Les travaux récents du GIEC, le rapport DRIAS 2020 et les travaux de RTE sur les scénarios énergétiques à 2050 pointent une évolution à la hausse des canicules et sécheresses hydrologiques (étiages notamment) ;

De fortes précipitations au début du mois de décembre 2003 associées à un problème de communication entre l'exploitant d'ouvrage hydroélectrique et celui du site nucléaire C ont conduit à augmenter brutalement le niveau du fleuve. Le CRES mentionne notamment « l'information alerte crue du fleuve a bien été donnée par l'exploitant d'ouvrage hydroélectrique au site nucléaire C dans le cadre d'une convention. Par contre, l'information lâcher de barrage ou ouverture des écrêteurs de crue n'est actuellement pas prévue dans cette convention ». Il s'agit donc bien d'une forme de conflit d'usage entre le besoin de gestion des crues par l'exploitant d'ouvrages hydroélectriques et les enjeux de sûreté/protection de l'environnement et de production du site nucléaire C. Cette défaillance est donc également organisationnelle. Les travaux du GIEC [5] et de DRIAS [6] montrent que la zone où se situe le site nucléaire C risque d'être assujettie à des précipitations extrêmes plus intenses et fréquentes en hiver. Les récents travaux du GIEC pointent également une hausse des débits des fleuves en Europe de l'Ouest et donc des inondations [8], même s'il existe de nombreuses incertitudes au niveau local. Si les conflits d'usage sont plutôt envisagés sur des situations de pénurie d'eau, on peut faire l'hypothèse que les problématiques de régulation du débit en période de crue peuvent également poser un problème, même si des conventions entre exploitant d'ouvrages hydroélectriques et exploitant de sites nucléaires existent.

Enfin, la problématique de l'arrivée massive de colmatants (ici des boues et débris végétaux) est en lien avec la combinaison de la situation de sécheresse/étiage de l'été 2003 et des précipitations/problèmes de régulation du débit, puis la crue de décembre 2003.

Cet évènement est particulièrement intéressant car il combine finalement plusieurs dimensions en lien avec les changements climatiques :

Une dimension multi-aléas, autant hydrométéorologiques (étiage puis pluie et crue) qu'organisationnels (enjeux de

<sup>6</sup> Un état de repli est un état qu'il est possible de rejoindre et dans lequel l'installation peut être maintenue dans des conditions de sûreté acceptables, compte tenu de l'indisponibilité et de l'état initial du réacteur.

coordination entre exploitant d'ouvrages hydroélectriques et celui du site nucléaire C) et environnementaux (une agression biologique qui provoque l'encrassement) ; Une dimension spatiale liée à la régulation du débit du fleuve le long du linéaire entre exploitant d'ouvrages hydroélectriques et celui du site nucléaire C ; Une dimension temporelle avec des événements espacés de plusieurs mois (canicule de 2003 et crue de décembre 2003) mais en lien direct, qui combinés, ont mené à l'évènement ;

Notons enfin que la canicule de 2003 et la crue de décembre 2003 sont deux événements considérés comme exceptionnels mais qui, au regard du changements climatiques, pourraient devenir plus intenses et plus fréquents.

## V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES DE MOBILISATION DE L'ETUDE

Cette étude exploratoire met en évidence un résultat qui peut paraître non intuitif à première vue, sur l'intérêt de combiner un travail sur le REX des événements et une réflexion sur les changements climatiques. En effet, en analysant ces événements au prisme des changements climatiques, nous pouvons mettre en évidence qu'ils se trouvent à la croisée de nombreuses thématiques et dévoilent des formes de conjonctions d'événements, dont les paramètres vont évoluer avec les changements climatiques. De nouvelles approches pourraient compléter les approches traditionnellement mobilisées par les spécialistes de la sûreté nucléaire (utilisation de données quantifiées, mobilisation du REX, méthodes statistiques...).

A cet égard, les approches narratives ou « storylines » semblent prometteuses. Alors que les spécialistes de la sûreté mobilisent des indicateurs chiffrés, basés sur le REX ou l'état de l'art, les approches narratives permettent de construire des histoires, des scénarios, en accordant sans doute moins de place à l'exactitude et à l'exhaustivité mais en permettant de sortir du cadre et d'apporter une vision réflexive et prospective. L'idée est alors de développer un scénario comme un déroulement physiquement cohérent d'événements passés ou/et de trajectoires futures plausibles. Aucune probabilité a priori du scénario n'est évaluée ; l'accent est plutôt mis sur la compréhension des facteurs impliqués et leur plausibilité [9]. Ces approches narratives sont aujourd'hui mobilisés dans les travaux du GIEC [10]. Dans le cas de notre étude exploratoire, la mobilisation du REX, par l'intermédiaire de séquences et/ou d'enchaînements d'événements apparaît pleinement pertinente et mobilisable pour construire des récits narratifs permettant de se projeter dans un futur plausible impacté par les effets du changements climatiques. En ce sens, on peut imaginer faire travailler un groupe de spécialistes de la sûreté appartenant à des disciplines et métiers variés et

de membres de la société civile, autour de ce genre de récit narratif, en s'affranchissant du cadre formel de l'analyse de sûreté. Ce travail pourrait apporter un regard nouveau, réflexif et prospectif sur les impacts plausibles des changements climatiques sur la sûreté nucléaire et la radioprotection et, in fine, faire naître des capacités d'innovation et de résilience face à des scénarios encore non prévus.

## ACKNOWLEDGMENT

Nous remercions l'IRSN pour la mise à disposition de l'application PIREX ainsi que nos relecteurs.

## REFERENCES

- [1] J. Couturier, *Éléments de sûreté nucléaire - Les réacteurs à eau sous pression*, EDP Sciences ed. Paris, 2021.
- [2] M. Mangeon, "Conception et évolution du régime français de régulation de la sûreté nucléaire (1945-2017) à la lumière de ses instruments : une approche par le travail de régulation," Mines ParisTech, Paris Sciences et Lettres, Paris, 2018.
- [3] ASN, "Rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2021," 2021.
- [4] R. Launay, C. Raynal, and J.-M. Rousseau, "De la page blanche à la boîte noire : quand le TALN devient éminence grise," presented at the Congrès Lambda Mu 22 « Les risques au cœur des transitions » (e-congrès) - 22e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Institut pour la Maîtrise des Risques, Le Havre (e-congrès), France, 2020.
- [5] IPCC, "AR6, WG1, Chapter 10: Linking global to regional climate change," 2021.
- [6] J.-M. Soubeyroux, S. Bernus, L. Corre, A. Drouin, B. Dubuisson, P. Etchevers, V. Gouget, P. Josse, M. Kerdoncuff, R. Samacoits, and F. Tocquer, "Rapport DRIAS 2020, Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole," Météo-France2020
- [7] RTE, "Futur énergétique 2050, Rapport complet, Chapitre 8 climat et système électrique," 2020.
- [8] IPCC, "AR6, WG1, Chapter 12: Climate change information for regional impact and for risk assessment," 2021.
- [9] T. G. Shepherd, E. Boyd, R. A. Calel, S. C. Chapman, S. Dessai, I. M. Dima-West, H. J. Fowler, R. James, D. Maraun, O. Martius, C. A. Senior, A. H. Sobel, D. A. Stainforth, S. F. B. Tett, K. E. Trenberth, B. J. J. M. van den Hurk, N. W. Watkins, R. L. Wilby, and D. A. Zenghelis, "Storylines: an alternative approach to representing uncertainty in physical aspects of climate change," *Climatic Change*, vol. 151, pp. 555-571, 2018/12/01 2018.
- [10] IPCC, "AR6, WG1, Chapter 1: Framing, Context, and methods," 2021.