



HAL
open science

Quand le passé éclaire l'avenir : Utiliser le retour d'expérience des événements pour réfléchir à l'impact du changement climatique sur la sûreté des installations nucléaires

Mickaël Mangeon, Claire-M Duluc, Launay Richard, Jean-M Rousseau

► To cite this version:

Mickaël Mangeon, Claire-M Duluc, Launay Richard, Jean-M Rousseau. Quand le passé éclaire l'avenir : Utiliser le retour d'expérience des événements pour réfléchir à l'impact du changement climatique sur la sûreté des installations nucléaires. 42ème Congrès Lambda Mu de l'IMdR - Congrès de maîtrise des risques et de sûreté de fonctionnement, IMDR, Oct 2022, Saclay, France. hal-03914251

HAL Id: hal-03914251

<https://hal.science/hal-03914251v1>

Submitted on 28 Dec 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.

Copyright



Quand le passé éclaire l'avenir :

Utiliser le retour d'expérience des événements pour réfléchir à l'impact du changement climatique sur la sûreté des installations nucléaires.

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 chaudes ». Nous proposons une typologie des événements et un exercice d'analyse et de prospective sur 3 événements au regard du changement climatique. 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-clés — Retour d'expérience, changement climatique, intelligence artificielle, sûreté nucléaire, crise.

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 "hot 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, crisis

I. INTRODUCTION

Le changement climatique impacte les températures, 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 France, l'exploitant nucléaire doit démontrer la sûreté de ses installations à l'autorité de sûreté nucléaire (ASN) et à son appui technique, l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN). En matière de sûreté nucléaire, la place occupée par les aléas hydrométéorologiques est importante. En effet ces événements peuvent entraîner des incidents ou même des accidents (comme ce fut le cas lors de l'accident nucléaire de Fukushima en 2011). Depuis les années 1960-1970, l'industrie nucléaire s'appuie notamment sur le retour d'expérience (REX) pour améliorer la sûreté des installations et de 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 par l'exploitant qu'il relate 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 mais sont également utilisées comme base du REX. Ces événements sont répertoriés dans des bases de données qui ont fortement évoluées au fil du temps. Aujourd'hui, l'application PIREX (Plateforme intégrée de retour d'expérience) de l'IRSN permet de réaliser de la fouille de textes. Ces analyses peuvent porter

sur l'intégralité des données, c'est-à-dire sur 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 collèges 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 ainsi que fut créé un groupe de travail sur le changement climatique (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 PIREX des événements en lien avec la thématique « températures chaudes ». Nous proposons une typologie des événements et un exercice d'analyse et de prospective sur 3 événements¹ au regard du changement climatique. 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 le changement climatique. Enfin, dans la partie conclusive, nous présenterons les perspectives de mobilisation de ce travail et les suites envisagées à l'IRSN.

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

¹ Nous avons volontairement simplifié et anonymisé les événements et les sites nucléaires impactés.

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.

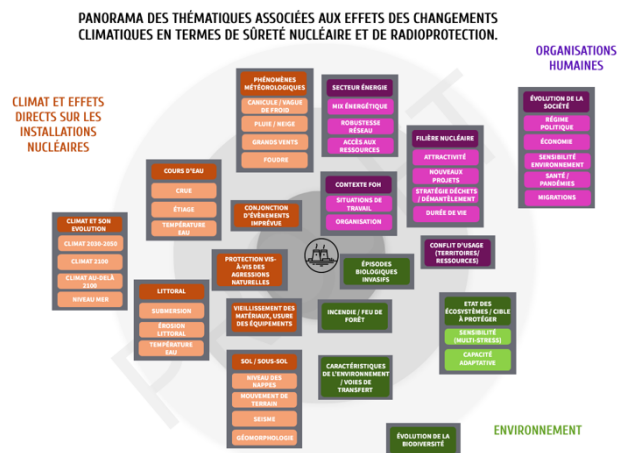


Figure 1 : Panorama des thématiques associées aux effets des changements climatiques en termes de sûreté nucléaire et de radioprotection, GT COR CC, 2021.

B. La création de DIMENSIONS et de COLLECTIONS avec PIREX

L'outil PIREX nous permet notamment de créer des DIMENSIONS et des COLLECTIONS dans l'optique d'obtenir une liste de CRES répondant à la thématique "température chaude" que nous avons défini. Cette partie revient sur les aspects méthodologiques de notre démarche.

1) L'outil des DIMENSIONS

Les DIMENSIONS permettent la fouille de données en mobilisant des algorithmes d'apprentissage supervisé (machine learning). Cette technique d'apprentissage est réalisée à partir de la constitution de deux collections de textes du corpus, ceux contenant l'objet de recherche et ceux ne le contenant pas. L'apprentissage est ainsi réalisé par boucles itératives d'entraînements (réussite/échec) [3]. Le principe général (du point de vue utilisateur) consiste, une fois la dimension suffisamment entraînée, par projection sur un corpus à identifier rapidement des CRES d'intérêt c'est-à-dire des comptes rendus d'événements qui contiennent a priori l'objet de recherche souhaité. Cette application vient en complément de la recherche textuelle pour l'affiner ou pour la systématiser.

La construction d'une DIMENSION permet ainsi de créer un index automatique, c'est-à-dire de classer tous les

documents d'un corpus existant et en cours de constitution en fonction d'objets d'intérêt. Tous les documents du corpus se voient ainsi affectés d'un résultat compris entre 0 et 1. 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. Il existe une zone d'indétermination de l'algorithme autour de 0,5, qui indique que l'algorithme n'a pas statué sur le classement. Les documents classés dans cette zone sont alors utilisés pour améliorer l'apprentissage. Ce classement automatique remplace l'indexation manuelle des documents après leur lecture et compréhension par un ou plusieurs acteurs qui ont une même représentation du mode de classement.

Dans le cadre de cette étude exploratoire, il a été envisagé de créer une dimension dont l'objet de recherche portait sur les « températures chaudes ». Ce choix a été réalisé en raison de l'intérêt du GT COR CC pour cette thématique. Nous avons fait le choix de réaliser deux DIMENSIONS en parallèle sur le même objet de recherche par deux utilisateurs différents. L'idée était, à partir de cette recherche en parallèle, de pouvoir tester l'homogénéité/hétérogénéité des résultats des DIMENSIONS sur le même sujet via un apprentissage supervisé par deux acteurs 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 une phase exploratoire de tester un biais d'apprentissage.

2) Deux recherches effectuées en parallèle sur PIREX.

Pour réaliser une COLLECTION initiale de CRES d'apprentissage en lien avec la thématique « Températures chaudes », deux recherches ont été menées en parallèle. Nous avons fait le choix de mêler des mots clés liés aux vagues de chaleur mais aussi aux sécheresses hydrologiques. Selon l'INRAE, la sécheresse peut être définie comme un déficit en eau anormal dans une ou plusieurs parties du cycle hydrologique terrestre². La canicule correspond à un épisode de températures élevées, de jour comme de nuit, sur une période prolongée. Il existe un lien physique entre canicule et sécheresse : lorsque les couverts végétaux réduisent leur transpiration pour diminuer leurs pertes en eau, la température s'élève. La première étape a été d'identifier des CRES répondant à la thématique avec une recherche par mots-clés. Les mots clés ont été définis parallèlement par deux utilisateurs de PIREX :

- Pour la recherche n°1 : Chaleur, Chaud, Température, Canicule, « période d'été », « Période de canicule », « température extrême », Soleil, grand chaud, forte température, Sécheresse, Extrême.

² Page internet « Qu'est-ce que la sécheresse ? | INRAE INSTIT » consultée le 18/05/2022. <https://www.inrae.fr/actualites/quest-ce-que-secheresse>

- Pour la recherche n°2 : Sécheresse, Canicule, Chaud, Température, « Tassement de terrain », Sol, Conflit, Etiage, Rejet, « Nappe phréatique » Chaleur, Dilatation, Thermique, fatigue, Aride.

Les résultats obtenus ont permis de créer un ensemble « positif » avec des CRES contenant l'objet de recherche et un ensemble « négatif » ne le contenant pas. Ensuite, nous avons « entraîné » la DIMENSION à partir de ces deux ensembles et nous avons réitéré le processus plusieurs fois, en l'associant à des recherches par mots-clés et en se basant sur un poids associé à la dimension supérieur à 0,8 pour l'ensemble positif et inférieur à 0,3 pour l'ensemble négatif

A la fin du processus, 115 CRES ont été retenus dans la recherche n°1 et 92 dans la recherche n°2.

Nous avons ensuite fusionné les 92 CRES et 115 CRES des deux collections et obtenu 115 CRES dont 92 CRES similaires qui ont été trouvés avec les deux méthodologies réalisées en parallèle. Ce constat nous amène à penser que, malgré une recherche de mots clés différente, les résultats obtenus peuvent être relativement similaires. Néanmoins, 23 CRES trouvés dans la recherche n°1 n'ont pas été retrouvés dans la recherche n°2. Nous y revenons dans la sous-partie suivante.

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

A partir de PIREX, nous avons extrait une feuille de calcul contenant les 115 CRES qui « mixe » les résultats des recherches n°1 et n°2. Le premier travail a consisté à ouvrir l'intégralité des CRES et à identifier les CRES 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 chaudes » mais sans lien avec des épisodes de canicules ou de vague de chaleur par exemple. La plupart du temps, il s'agit de montée de températures de matériaux et/ou équipements internes. Nous avons deux explications à ce phénomène :
 - L'apprentissage supervisé a décelé des liens entre ces CRES et d'autres, qui eux, sont en rapport direct avec un aléa hydrométéorologique. En effet, on retrouve dans ces 51 CRES des équipements ou des problématiques identiques dans des CRES en lien avec des aléas hydrométéorologiques.
 - La compréhension du sujet de recherche a été différente entre les deux utilisateurs. L'expert ayant réalisé la recherche n°1 a eu une vision plus large du sujet, en incluant plus d'événements sans lien avec les aléas

hydrométéorologiques mais liés à des augmentations de températures sur les procédés.

- 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 est lié au référentiel grand chaud mais sans aléa hydrométéorologique identifié).

Nous avons ensuite démarré un travail de typologie sur les CRES en lien avec les aléas hydrométéorologiques.

D. Choix d'une typologie et sélection de CRES d'intérêts

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. Ce travail fait donc appel à un travail d'expertise et présente une forte part de subjectivité. Les thématiques ont été ajoutées sans lien avec les changements climatiques et/ou sans préjuger de l'impact de l'événement sur l'environnement et la sûreté. Sur cet exemple (Figure 2), l'état des écosystèmes/cible à protéger est mentionné car l'arrêté de rejet est dépassé mais cela n'implique pas forcément de conséquences en matière de protection de l'environnement. De même, nous n'établissons, a priori, aucun lien entre les thématiques et les changements climatiques. Par exemple, si nous mentionnons un lien avec la thématique « pluie/neige », ce n'est pas sous l'angle du changement climatique. Cette réflexion sera néanmoins présentée dans la partie IV, de manière prospective, pour 3 CRES.

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

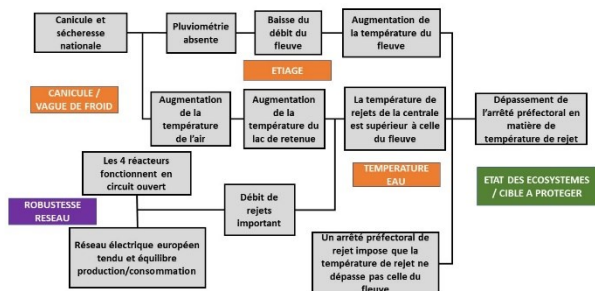


Figure 2 : Exemple d'arbre des causes et liens avec les thématiques du GT COR CC

2) Choix de CRES d'intérêts pour une analyse approfondie

Nous avons réalisé une analyse plus spécifique de 3 CRES en lien avec des aléas hydrométéorologiques de type

« températures chaudes » 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 projections quantitatives plus poussées) 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 CRES

Dans un premier temps, nous avons donc classé les 63 CRES retenus pour leur lien avec des aléas hydrométéorologiques de l'extraction PIREX sur la dimension « température chaude » en fonction des thématiques du panorama réalisés dans le cadre des travaux du GT COR CC (Figure 3). Plusieurs thématiques peuvent être associées à un seul CRES, nous y reviendrons dans la sous-partie suivante.

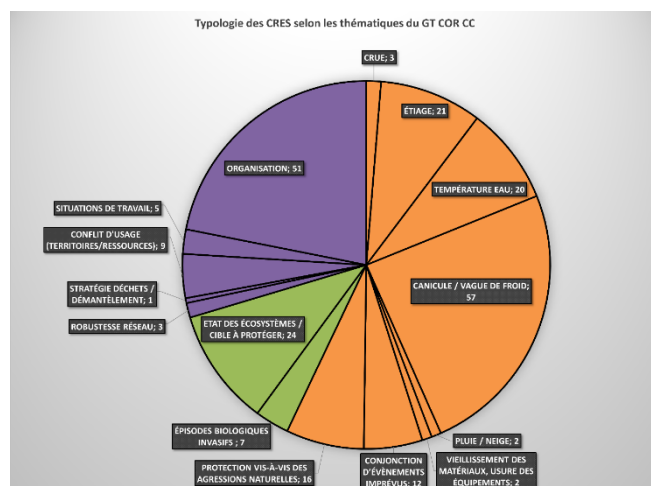


Figure 3 : Typologie des CRES identifiés lors de la recherche « Température chaude » en fonction des thématiques du GT COR CC

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 de données. 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'étiages 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/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, 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 sous-partie 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 montre, comme l'indique les CRES, la mise à jour de convention entre les différents exploitants.

- 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 conflits 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, pluies, stratégie 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 et en fonction de l'analyse des causes réalisées 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).

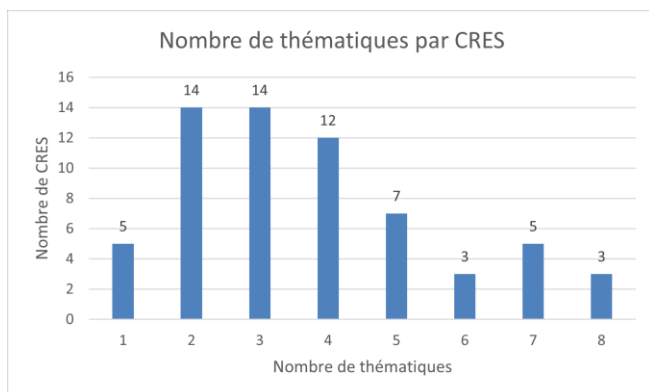


Figure 4 : Nombre de thématiques par CRES

Nous pouvons en tirer les enseignements suivants :

- La grande majorité des CRES (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 + 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 + Etiages + Températures. »

C. Le lien entre événements hydrométéorologiques, saisons et CRES

La majorité des événements de notre base de données est lié 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).

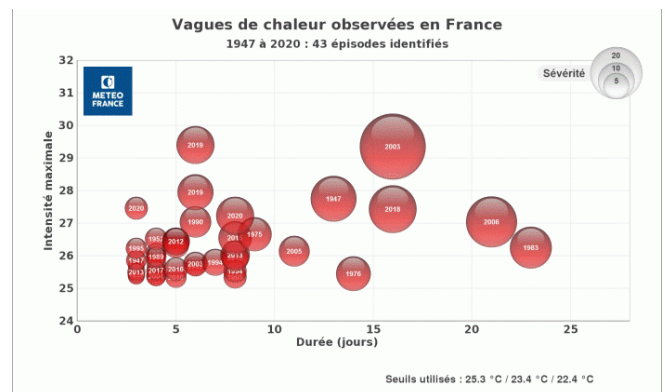


Figure 5 : Vagues de chaleur observées en France de 1947 à 2020, Météo-France

Nous pouvons voir sur la Figure 6, une typologie 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 événements arrivant plus tardivement (notamment le CRES R13850, analysé en 3.3.1).
- 4 événements se déroulant l'été en lien avec la canicule de 2006 ;
- 2 événements se produisant au printemps en lien avec la sécheresse hydrologique de 2011 ;
- 8 événements se déroulant en été en lien avec la canicule de 2019.

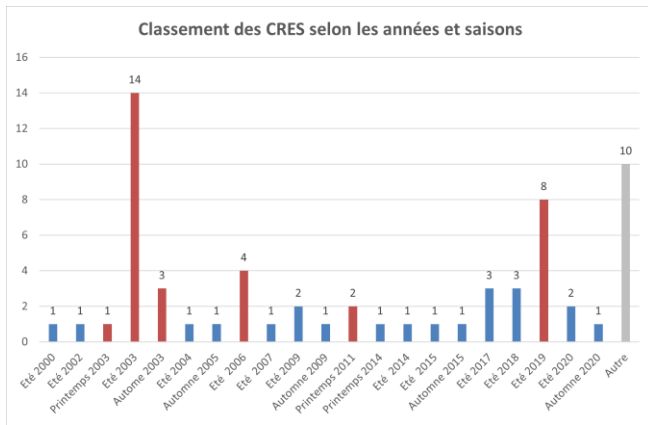


Figure 6 : Classement des CRES selon les années et saisons

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, en lien avec la thématique des températures chaudes 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 direct avec un événement hydrométéorologique.

IV. ANALYSE DE 3 CRES AU REGARD DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Nous avons réalisé une étude plus spécifique de trois CRES pour lesquels nous avons débuté 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 conséquences variées pour proposer un panel de CRES touchant à différents paramètres liés aux changements climatiques.

A. CRES : Température de rejets (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 ajuste la production électrique produite afin de redescendre le plus rapidement possible en dessous du seuil de température calculée après mélange fixé par l'arrêté de rejet et les deux dérogations, tout en maintenant la production minimum garantissant la sécurité d'une autre installation nucléaire à proximité, et la sécurité du réseau électrique d'une partie de la France. On observe le dépassement à plusieurs reprises de la température calculée après mélange des

rejets thermiques du site nucléaire, au cours de la période de fortes chaleurs et 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 de manière non anticipable par l'exploitant nucléaire. La conséquence réelle est une température maximale mesurée en aval du site est restée voisine de 28° C. Les premiers résultats des contrôles montrent qu'il n'y a eu aucune conséquence réelle sur l'environnement. En vue d'évaluer les conséquences potentielles sur l'environnement, 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 du site nucléaire A pour cet événement, nous pouvons positionner des thématiques/sous thématiques issues des travaux sur le panorama du GT COR CC. Nous avons positionné 10 thématiques/sous thématiques sur l'enchaînement causal de cet événement (Figure 7). Nous avons ajouté les thématiques « Sensibilité environnement » et « économie » car nous pensons qu'elles sont utiles à la réflexion.

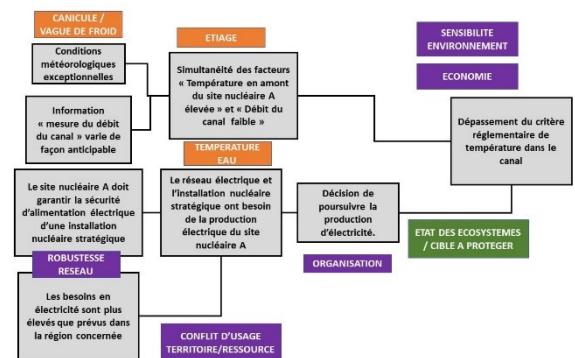


Figure 7 : Arbre des causes simplifié et rapports aux thématiques changements climatiques du CRES Température de rejets (Site nucléaire A)

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

Nous pouvons alors réfléchir à une série de paramètres qui semblent importants à analyser dans le cadre d'une réflexion sur les impacts possibles des changements climatiques sur un événement 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 (Evolution à la hausse des étiages et températures de l'eau notamment) entraînant une hausse (modérée) des indisponibilités des centrales nucléaires.

- La situation relève clairement d'un conflit d'usage de l'eau avec une situation de tension sur la ressource entre l'exploitant d'ouvrages hydroélectrique 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.

- La robustesse du réseau électrique français a été également mise à rude épreuve par l'évènement. A plusieurs reprises, le gestionnaire du réseau électrique est intervenu pour demander le maintien de la production électrique du site nucléaire A. Cette situation de tension entre besoin 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 de l'eau et de la baisse de 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, notamment pour des besoins de sûreté (redondance). 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 prendre le dessus, notamment quand la situation peut engendrer une crise sur le réseau électrique. En ce sens, la décision de l'autorité de sûreté d'accorder une dérogation à l'exploitant sur les températures de rejets est liée à cette situation de tension sur le réseau. Nous faisons l'hypothèse que ce type de décision impliquant sûreté et enjeux de production, devrait se reproduire plus fréquemment avec les changements climatiques et pourrait potentiellement affaiblir le rôle du contrôleur et de l'expert public. 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 canicules et de sécheresses hydrologiques. 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 relaxées, dans notre cas, par des dérogations de l'autorité de sûreté sur les températures de rejets. Dans ce type de situation qui pourrait devenir plus fréquente avec les changements climatiques, le rôle des organes de sûreté et de l'expert public peut apparaître complexe, lorsque les enjeux industriels et économiques deviennent prioritaires.

B. CRES : Rejets 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 de d'un échangeur RRI³ lors de sa remise en service après nettoyage. L'origine est une fuite sur un échangeur liée à des plaques d'échangeurs RRI défectueuses. 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 mais non significatif. 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 du site nucléaire B, nous pouvons positionner des thématiques/sous thématiques issues des travaux sur le panorama du GT COR CC. Nous avons positionné 6 thématiques/sous thématiques sur l'enchaînement causal de cet évènement (Figure 8).

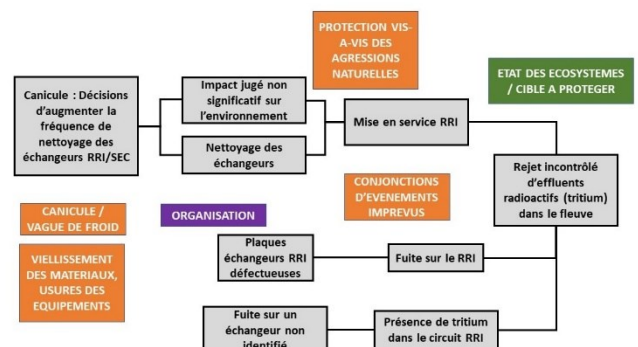


Figure 8 : Arbre des causes simplifié et rapports aux thématiques changements climatiques du CRES rejets d'effluents radioactifs (Site nucléaire B)

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

Nous pouvons alors réfléchir à 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 en plein canicule de l'été 2003. Suite à l'état climatique exceptionnel, eu égard à la sûreté de la tranche et du réseau, le site nucléaire B renforce la

³ Le circuit de réfrigération intermédiaire (RRI) assure le refroidissement d'un certain nombre d'équipements importants pour la sûreté du réacteur.

surveillance de la source froide et engage l'anticipation du nettoyage des échangeurs SEC/RRI. La situation de canicule (associée à un faible débit du fleuve) conduit à un nettoyage fréquent des échangeurs. 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).

- Une fuite est décelée sur le RRI et va conduire à des rejets incontrôlés de tritium dans le fleuve. La fuite provient d'une plaque d'un échangeur RRI qui est alors changé (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 de type plus ancien et l'exploitant note également 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). 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 événement se reproduira dans le futur et il est également envisageable que des difficultés d'approvisionnements et/ou de logistiques 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 équipements en situation de canicule, notamment au regard de tensions possibles sur l'approvisionnement en pièces de rechanges (Pénurie de métaux, difficultés logistiques, hausse des prix...)

C. CRES : Passage en état de repli 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 un débit important du fleuve, ce qui, associé 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 /SEC⁴ (arrivées de boues et de débris végétaux). On note le passage en état

⁴ Le circuit d'eau brute secouru (SEC) assure le refroidissement du RRI au moyen de la source froide.

de repli⁵ des réacteurs n° 3 et 4 en application de la conduite à tenir de l'évènement de groupe 1 RRI6. Les conséquences potentielles de cet évènement sont la perte totale de la source froide (RRI/SEC).

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

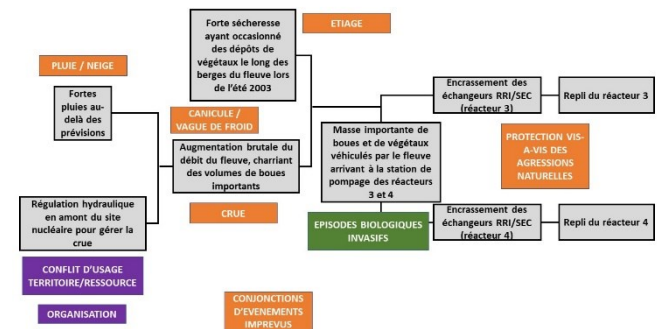


Figure 9 : Arbre des causes simplifié et rapports aux thématiques changements climatiques du CRES passage en état de replis réacteurs 3 et 4 (Site nucléaire C)

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

Nous pouvons alors réfléchir à 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 fleuve. Le CRES note 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

⁵ 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.

sûreté/production du site nucléaire C. Cette défaillance est donc également organisationnelle. Les travaux du GIEC et de DRIAS montrent que la zone où se situe le site nucléaire C sera assujettie à des précipitations extrêmes plus intenses et fréquentes en hiver. 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 site nucléaire existent. Les récents travaux du GIEC pointent une augmentation des inondations en hiver même s'il existe de nombreuses incertitudes au niveau local.

- Enfin, la problématique de l'arrivée massive de colmatant est en lien avec la combinaison de l'évènement de sécheresse/étiage de l'été 2003 et des précipitations/problème de régulation du débit puis crue de décembre 2003.

Cet évènement est particulièrement intéressant car il combine finalement plusieurs processus en lien avec le changement climatique :

- Une dimension multi-aléas, autant hydrométéorologiques (Étiage puis pluie et crue) qu'organisationnels (problème de 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 évènements espacés de plusieurs mois (canicule de 2003 et crue de décembre 2003) mais en lien direct, qui combinés, ont mené à l'évènement.

Il est à noter que la canicule de 2003 et la crue de décembre 2003 sont deux évènements considérés comme exceptionnels mais qui, au regard du changement climatique pourraient devenir plus intenses et plus fréquents.

V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES DE MOBILISATION DE L'ETUDE

Cette étude exploratoire met en évidence l'intérêt de combiner un travail sur le REX des évènements et une réflexion sur les changements climatiques. En effet, en analysant ces évènements 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'évènements, 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 des données quantifiées, du REX, méthodes statistiques...).

En ce sens, les approches narratives ou « story lines » semblent prometteuses. Alors que les spécialistes de la sûreté mobilisent des indicateurs chiffrés et robustes, 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'évènements passés ou/et de trajectoires futurs plausibles. Aucune probabilité a priori du scénario n'est évaluée ; l'accent est plutôt mis sur la compréhension des facteurs impliqués et leur plausibilité. [8]. Ces approches narratives sont aujourd'hui mobilisées dans les travaux du GIEC [9].

Dans le cas de notre étude exploratoire, la mobilisation du REX, par l'intermédiaire de séquences et/ou d'enchaînements d'évènements afin de construire des récits narratifs permettant de se projeter dans un futur plausible impacté par les effets du changement climatique. 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 permettre d'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 impensés.

ACKNOWLEDGMENT

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

REFERENCES

- [1] J. Couturier, IRSN, Ed. *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, 2020-10-13, 2020. [Online]. Available: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03483325>.
- [5] IPCC, "AR6, WG1, Chapter 10: Linking global to regional climate change", 2021.
- [6] J.-M. Soubeyroux et al., "Rapport DRIAS 2020, Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole," Météo-France, 2020
- [7] RTE, "Futur énergétique 2050, Rapport complet, Chapitre 8 climat et système électrique," 2020.
- [8] T. G. Shepherd et al., "Storylines: an alternative approach to representing uncertainty in physical aspects of climate change," *Climatic Change*, vol. 151, no. 3, pp. 555-571, 2018/12/01 2018, doi: 10.1007/s10584-018-2317-9.

[9] IPCC, "AR6, WG1, Chapter 1: Framing, Context, and

methods", 2021.