

## Comité d'orientation des recherches

### Avis relatif à la prise en compte des changements climatiques dans l'orientation des recherches en sûreté nucléaire et en radioprotection

#### 1) Mandat du groupe et déroulement des travaux

En octobre 2020, le Comité d'Orientation des Recherches (COR) de l'IRSN s'est saisi de la question des changements climatiques et a décidé de mettre en place un groupe de travail (GT) afin de réfléchir à leurs impacts. Le mandat confié à ce GT consistait à identifier et prioriser les questions et besoins de connaissances qui mériteraient d'être pris en compte dans les programmes de recherche de l'IRSN et, de manière plus générale, pour l'évaluation et la maîtrise des risques nucléaires et radiologiques. Il précisait que les questions et besoins de connaissances avaient vocation à refléter les attentes de la société et des différentes parties prenantes composant le COR.

Le GT, présidé par Lionel Larqué, délégué général d'Alliss, était composé de représentants des différentes parties prenantes de l'Institut (associations, élus, État, industriels, syndicats). Ont ainsi contribué aux travaux : Patrick Bianchi (CFTC), Dominique Boutin (FNE), François-Marie Bréon (IPSL/LSCE), Frédéric Brun (Orano), Jean-Paul Cressy (CFDT), Jean-François Dhedin (EDF), Pascale Ebner et Magali Domergue (MTE-CT), Joël Guerry (Ancli/Cli de Bugey/Sortir du Nucléaire), Christian Holbe (CGT), Jean-Paul Lacote (FNE), Patrick Landais (CEA), Claire Tronel (Andra), Lionel Larqué (Alliss), Léna Lebreton (CGT, représentante des salariés au conseil d'administration de l'IRSN), Emmanuel Moulin (Ancli/Clin du Blayais/EDF), Sandra Moll (ASN).

Le GT a bénéficié de l'appui de l'IRSN et plus particulièrement de Claire-Marie Duluc, en tant que coordinatrice technique, Renaud Martin, en tant que coordinateur ouverture à la société, et Didier Gay, qui a participé aux travaux au titre de secrétaire scientifique du COR. Michaël Mangeon a contribué à la première phase du travail pour le compte de l'Institut. Il a été impliqué de manière plus ponctuelle dans la suite des échanges.

Le GT a organisé son travail en quatre phases.

La **première phase** a consisté à élaborer un **panorama des connaissances** identifiant les diverses thématiques associées aux changements climatiques et susceptibles d'avoir une incidence directe ou indirecte sur la sûreté et la radioprotection. Cette étape s'est appuyée sur les contributions des membres du COR et des organisations qu'ils représentent ainsi que sur des échanges avec les équipes de l'IRSN. Destinée à une exploration large des impacts climatiques, cette première phase a conduit à **identifier 18 thématiques et 42 sous-thématiques** qui couvrent aussi bien l'évolution des paramètres météorologiques et hydrologiques, les modifications des caractéristiques environnementales que les conséquences sur les facteurs humains et organisationnels et plus largement sur la société.

Au cours d'une **deuxième phase**, le GT a sélectionné **cinq thématiques** figurant dans le panorama, qu'il jugeait **prioritaires** et souhaitait approfondir. Les thématiques retenues sont :

1. Le climat et les aléas météorologiques,
2. Le vieillissement des matériaux et la fiabilité des équipements,
3. Les interactions entre système électrique et fonctionnement du parc nucléaire,
4. La modification de l'environnement et des écosystèmes,
5. Les conjonctions d'événements imprévus.

Au cours d'une **troisième phase**, les thématiques retenues ont fait l'objet de travaux **d'approfondissement**. L'approfondissement des quatre premières thématiques a pris la forme

d'auditions<sup>1</sup>. La cinquième thématique, plus vaste et difficile à baliser, a fait l'objet d'un **séminaire de réflexion interdisciplinaire**<sup>2</sup> organisé en quatre tables-rondes qui ont rassemblé douze intervenants extérieurs le 20 octobre 2022.

La **quatrième et dernière phase** a été consacrée à la rédaction collective du présent avis et d'un rapport d'accompagnement présentant le travail mené au sein du GT.

## 2) Commentaires préliminaires et structuration des recommandations

### *Un cadre et des doctrines fondés sur le contrôle et la maîtrise, mis au défi des changements climatiques*

Les travaux du GT ont fait émerger **deux dimensions plus particulièrement structurantes** : le **caractère systémique** des conséquences des changements climatiques ; la **question des incertitudes, de la prédictibilité et de la maîtrise** des situations auxquelles toutes les organisations humaines devront faire face à l'avenir, la filière nucléaire ne faisant pas exception.

Au fil des travaux, et en particulier à l'occasion du séminaire interdisciplinaire évoqué précédemment, il est apparu clairement que les changements climatiques vont provoquer une évolution de l'ensemble des composantes, physiques, biologiques, sociales, sociétales, géopolitiques, qui définissent le cadre d'action et de gouvernance des sociétés humaines actuelles et futures. Cette évolution d'ensemble est source d'instabilités durables et d'évènements inédits par leur ampleur ou leur nature, qui vont irrévocablement remplacer le cadre existant par un cadre inédit. Du fait de l'incapacité des connaissances actuelles à pleinement caractériser les phénomènes en jeu mais aussi de la difficulté à prédire la manière dont les sociétés humaines vont réagir et s'adapter, ce nouveau cadre ne peut être appréhendé qu'avec un degré d'incertitude élevé.

Pour le GT, **les fondements actuels de la sûreté nucléaire, basés sur le contrôle et la maîtrise** (des phénomènes, des installations, etc.), **se retrouvent mis à l'épreuve par l'émergence de ces nouveaux enjeux qui appelle à faire preuve d'humilité et à miser sur l'adaptation et la résilience**. Cette considération n'est évidemment pas une invitation à abandonner les fondements de la sûreté nucléaire et à renoncer à la mobilisation des savoirs scientifiques au service de la prédiction. Elle est en revanche une incitation à renforcer l'ouverture à tous les types de savoirs, que ces savoirs relèvent de connaissances scientifiques, de savoirs d'action ou d'expérience.

Il convient ainsi d'instituer des espaces de débats et de désaccords féconds, les plus ouverts possibles, afin d'instruire les dissensus de fond. Aucune institution seule ne pouvant maîtriser les enjeux soulevés par les changements climatiques, l'ouverture, l'interdisciplinarité, les fécondations croisées de modes, méthodes et cadres de pensée et de recherche, doivent constituer les principes mobilisés pour définir et mettre en œuvre un programme de recherche sur le sujet.

### *Une réflexion centrée sur les réacteurs électronucléaires et marquée par la montée des exigences de disponibilité*

Les réflexions menées par le GT ont été alimentées par les discussions intervenues entre ses membres et par les échanges organisés avec les équipes de l'IRSN et les personnalités auditionnées. Elles ont été également largement influencées par une actualité et un contexte général dans lesquels les changements climatiques et le nucléaire occupent une place de premier rang. Les épisodes de sécheresse, de canicule et les incendies d'ampleurs inédites intervenus en France à l'été 2022 ont renforcé la prise de conscience de la nature et de l'ampleur des bouleversements climatiques en cours. Ils ont également souligné les relations multiples, synergiques et parfois antagonistes, que nourrissent l'énergie nucléaire et le climat. Doté du statut de source d'énergie bas carbone, le nucléaire français se trouve à un moment charnière de son histoire, marqué par une volonté de relance vigoureuse de la filière - portée au plus haut niveau de l'Etat - et le projet de prolongation du parc existant. Dans le même temps, le nucléaire est questionné sur

---

<sup>1</sup> Ont été auditionnés des membres de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), de Réseau de Transport d'Electricité (RTE), de l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae) et du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB).

<sup>2</sup> Les spécialités des intervenants étaient rattachées à la sociologie, l'économie, les facteurs humains et organisationnels, l'histoire, l'hydrologie, la géographie ou encore la gestion de des risques naturels.

sa capacité à s'adapter aux conséquences du réchauffement global, du fait notamment des besoins importants de ressources en eau pour le refroidissement des réacteurs. Ce questionnement apparaît désormais comme un sujet de controverse au même titre que ceux, plus traditionnels, relatifs aux risques, aux déchets ou aux coûts du nucléaire.

La première conséquence des éléments de contexte précédents a été la **focalisation des discussions du GT sur une catégorie d'installations : les réacteurs électronucléaires**. Les membres du GT assument ce biais qu'ils justifient par les enjeux majeurs que représente le parc EDF, des points de vue économique, industriel, sociétal mais aussi du point de vue des enjeux de sûreté. Ils tiennent néanmoins à souligner les problématiques spécifiques soulevées par d'autres catégories d'installations nucléaires dans le contexte des changements climatiques. Ils notent ainsi les enjeux particuliers liés :

- aux installations de stockage de déchets, du fait des échelles de temps (pour certains plusieurs centaines à plusieurs dizaines de milliers d'années) à prendre en considération pour évaluer leur sûreté à long terme ;
- aux installations disposant de locaux difficiles à rafraîchir et dans lesquels la réalisation d'opérations nécessitant le port de tenues et équipements de protection peut s'avérer difficile lors d'épisodes de chaleurs intenses. De telles situations pourraient tout particulièrement survenir lors de chantiers de démantèlement ;
- aux installations dotées de digues ou talus dont la tenue est susceptible d'être affectée par des épisodes météorologiques inédits (précipitations violentes, sécheresse, etc.). Les stockages de résidus miniers et les bassins d'entreposage du site Orano à Malvési, notamment, entrent dans cette catégorie ;
- aux installations accueillant des produits pouvant présenter une sensibilité aux conditions de température élevées du fait de leur réactivité chimique en particulier.

Une deuxième conséquence tient à la **complexification des enjeux qui mêlent désormais de manière de plus en plus étroite les considérations de sûreté et les exigences de disponibilité**. Au cours de leurs travaux, les membres du GT ont veillé à focaliser leur attention sur les considérations de sûreté et de radioprotection et à laisser de côté les questions ayant trait à la disponibilité des installations. En pratique, il est toutefois apparu qu'une même situation soulevait souvent des questions relevant des deux dimensions et qu'une caractérisation correcte de l'ensemble des situations dégradées induites par les conséquences des changements climatiques était souhaitable, même lorsque les enjeux de sûreté pouvaient sembler, de prime abord, limités. Cette analyse élargie est apparue d'autant plus pertinente au GT que le contexte de la transition énergétique et les enjeux historiques auxquels fait face la filière nucléaire française conduisent à accorder une importance grandissante à la disponibilité du parc. La montée des intérêts industriels de réponse à la demande et des intérêts nationaux d'équilibre du réseau conduit à mettre sous pression les décisions relatives au fonctionnement des réacteurs. Alors que la sûreté bénéficiait jusque-là d'une forme de primauté, elle pourrait à l'avenir être intégrée dans des arbitrages tenant compte d'autres intérêts. Cette perspective devrait avoir une incidence sur les processus d'évaluation et de prise de décision mais elle devrait également générer de nouveaux besoins de connaissance. Préserver la robustesse de la décision requerra, en effet, des arguments étayés, facilement appropriables et permettant de peser clairement les différents enjeux associés aux situations rencontrées. Compte tenu des multiples perturbations qu'ils vont provoquer, les changements climatiques devraient être à l'origine de situations de ce type qui nécessiteront dès lors d'être suffisamment bien caractérisées. Les épisodes d'étiage et d'augmentation des températures des cours d'eau servant au refroidissement des centrales en fournissent un exemple.

### *Un jeu de huit recommandations définissant une démarche d'ensemble*

Les considérations générales précédentes et l'exploration des différentes thématiques identifiées dans le panorama des connaissances, conduisent le COR à formuler ci-après **huit recommandations**.

Au travers des deux premières, le COR invite l'IRSN à tenir pleinement compte des modifications en profondeur induites par les changements climatiques. Parce qu'elles touchent simultanément de nombreux champs de recherche couverts par l'IRSN, les conséquences des changements climatiques nécessitent d'être abordées dans un cadre permettant de dépasser les fermetures disciplinaires et de faciliter l'émergence d'une vision transverse. Face à cette exigence, des organismes de recherche tels que

L'Inrae se sont dotés de modes d'organisation spécifiques. La recommandation n°1 invite l'IRSN à s'en inspirer en mettant en place un métaprogramme garant de l'interdisciplinarité et de l'animation d'ensemble des travaux. Parce que les conséquences des changements climatiques sont à l'origine de transformations dépassant les stricts domaines d'intervention de l'Institut, elles doivent être abordées dans un contexte partenarial large et ouvert, impliquant les différentes parties prenantes. C'est le sens de la recommandation n°2.

Ce cadre général étant posé, les recommandations du COR abordent ensuite six aspects plus ciblés qui constituent des briques de la démarche d'ensemble.

Le premier aspect est d'ordre méthodologique. Porté par la recommandation n°3, il appelle à adopter une approche par scénarios, à la fois pour explorer plus ouvertement le champ des possibles et pour servir de support à une réflexion interdisciplinaire, à un remontage des connaissances à l'échelle des systèmes.

Viennent ensuite trois briques correspondant à des aspects couverts par les programmes de recherche de l'IRSN et sur lesquels le COR identifie des compléments ou réorientations utiles. La recommandation n°4 souligne les incidences potentielles des changements climatiques sur les comportements individuels et le fonctionnement des organisations et encourage l'IRSN à mobiliser ses compétences en sciences humaines et sociales pour les étudier. La recommandation n°5 porte sur l'évaluation des aléas météorologiques et hydrologiques et invite les équipes de l'IRSN à un rapprochement volontariste de la communauté des sciences du climat. La recommandation n°6 s'intéresse aux impacts environnementaux des sites nucléaires et appelle à redéfinir les besoins de connaissance dans ce domaine à partir d'une projection de l'évolution des socio-écosystèmes territoriaux sous l'influence des changements climatiques.

Les deux dernières recommandations abordent des aspects à ce jour non explicitement couverts par les programmes de recherche de l'IRSN. La recommandation n°7 aborde la question de l'impact thermique des centrales nucléaires sur les cours d'eau et souligne l'importance de disposer d'un socle de connaissance scientifique solide pour fonder les décisions réglementaires encadrant le fonctionnement des réacteurs, notamment lorsqu'elles prévoient des dispositions dérogatoires. Elle incite l'IRSN, en lien avec l'ASN, à étudier l'opportunité de son implication sur le sujet. La recommandation n°8 appelle enfin à explorer de manière approfondie les besoins de modulation associés aux évolutions possibles du mix électrique et les conséquences qu'ils pourraient avoir sur le fonctionnement du parc nucléaire et la sûreté des réacteurs.

Le COR note que plusieurs de ses recommandations rejoignent les conclusions mises en avant par la Cour des comptes dans son rapport consacré à l'adaptation au changement climatique du parc des réacteurs nucléaires, publié en mars 2023<sup>3</sup>. C'est notamment le cas de l'intérêt d'une approche systémique de l'adaptation, qui fait l'objet d'un chapitre spécifique du rapport de la cour, et du besoin de consolidation et de mise à jour des fondements scientifiques justifiant les limites réglementaires applicables aux rejets thermiques des réacteurs nucléaires, qui fait l'objet d'une recommandation.

Le COR note enfin que l'approfondissement du sujet relatif au vieillissement des matériaux et à la fiabilité des équipements n'a pas conduit à formuler de préconisation particulière. Les recherches engagées par l'IRSN dans ce domaine apparaissent suffisamment larges pour couvrir les enjeux particuliers liés aux changements climatiques.

### 3) Les recommandations

#### **Recommandation 1 : Mettre en place à l'IRSN un métaprogramme « Sûreté nucléaire, radioprotection et changement climatique »**

Les conséquences des changements climatiques sur la sûreté et la radioprotection sont de nature systémique. Leurs dimensions spatiales, temporelles, heuristiques, épistémologiques, interdisciplinaires sont d'une ampleur telle qu'il apparaît qu'une réponse adaptée ne pourra probablement pas se satisfaire d'une juxtaposition de projets séparés. Elles constituent un objet de recherche ayant de multiples composantes. Certaines relèvent du champ des sciences de la Terre, d'autres des sciences de l'ingénieur, d'autres encore des sciences de l'environnement et des sciences humaines et sociales. Au cours de sa réflexion, le GT a

---

<sup>3</sup> Adaptation au changement climatique du parc de réacteurs nucléaires, Communication à la commission des finances du Sénat, Cour des comptes, mars 2023 ([lien](#)).

ainsi interagi avec quatre services de l'IRSN intervenant chacun dans un champ différent : évaluation des aléas naturels, évaluation des systèmes nucléaires, analyse des facteurs humains et organisationnels, évaluation des effets sur l'environnement.

Faute d'un cadre *ad hoc*, le COR considère qu'il sera difficile de faire émerger une vision d'ensemble et d'articuler les différentes dimensions du sujet. Décliner selon une approche classique, disciplinaire et sectorisée les différentes recommandations formulées ci-après ne saurait être une réponse à la hauteur des enjeux.

Face aux défis scientifiques et sociétaux complexes soulevés par la transition des systèmes agricoles et alimentaires, l'Inrae a mis en place des dispositifs d'animation et de programmation spécifiquement destinés à accompagner des approches interdisciplinaires, à mettre en visibilité des sujets considérés comme stratégiques et à faire émerger des collectifs pouvant contribuer à leur résolution. Mis en place en 2010, ce dispositif repose sur la notion de métaprogramme. Lancé pour une durée de 5 à 8 ans, un métaprogramme répond à des orientations inscrites dans un document fondateur. Il dispose d'un budget alloué par l'Inrae pour organiser des événements scientifiques, constituer et animer un réseau interne, lancer des projets de recherche interdisciplinaires et des travaux de thèse.

***Le COR recommande de s'inspirer de l'exemple de l'Inrae et de mettre en place au sein de l'IRSN un métaprogramme consacré à l'étude des conséquences des changements climatiques sur la sûreté nucléaire et la radioprotection.***

L'élaboration du document fondateur de ce métaprogramme pourra directement s'inspirer des recommandations formulées dans le présent avis. Le COR reconnaît le caractère ambitieux de ces recommandations et l'importance du travail que nécessitera leur mise en œuvre. Il considère que **le métaprogramme peut jouer un rôle essentiel de priorisation et de planification des objectifs scientifiques et permettre de mettre en place une dynamique s'inscrivant dans la durée.**

Le COR reconnaît également la tension que peut susciter le développement de nouvelles approches et de nouveaux concepts dès lors qu'ils peuvent être perçus comme une remise en cause des référentiels d'évaluation existants. Pour accorder aux travaux couverts par le métaprogramme toute leur liberté d'action, il considère ainsi important de les positionner suffisamment à l'écart des pressions opérationnelles de la décision et de **préciser les modalités et la temporalité selon lesquelles les connaissances produites seront transférées vers l'expertise et la gestion de crise.**

Le COR suggère enfin que la mise en place du métaprogramme soit l'occasion de **prolonger les réflexions de nature fondamentale initiées lors du séminaire interdisciplinaire du 20 octobre 2022**, en prévoyant, dans sa mission d'animation scientifique, la reconduction régulière d'exercices de ressourcement intellectuel du même type.

## **Recommandation 2 : Inscire résolument les travaux de l'IRSN dans une logique de partenariat large et ouvert**

Au travers de sa composition et de sa méthode de travail pluraliste, le GT a expérimenté la plus-value qu'apporte une démarche d'ouverture à la société pour l'instruction de sujets complexes et protéiformes tels que celui qui lui a été confié. Comme le montrent les recommandations qui suivent, la nature des actions à mettre en œuvre s'accompagne par ailleurs d'une exigence de haut degré de partenariat. Chacun des sujets abordés renvoie en effet à un besoin d'appropriation par l'Institut de réflexions, de démarches ou d'outils relevant d'acteurs académiques (la communauté des sciences du climat pour la recommandation n°5), d'acteurs institutionnels (l'ASN et le MTE-CT pour la recommandation n°7), d'acteurs industriels ou sectoriels (RTE pour la recommandation n°8), d'acteurs territoriaux (pour la recommandation n°6). Il est donc essentiel que les travaux qui seront lancés s'effectuent dans le cadre de partenariats adaptés et il serait vain que les équipes de l'Institut les conduisent de manière isolée.

***Le COR recommande donc que l'IRSN inscrive les travaux qu'il initiera dans une logique de partenariat large et ouvert.***

Le COR note qu'établir ces cadres partenariaux nécessitera de la part de l'IRSN une volonté résolue d'ouverture, en direction des acteurs de la société civile bien sûr, mais également vers les autres acteurs mentionnés précédemment. Il souligne que si cette volonté est nécessaire, elle peut ne pas être suffisante en l'absence d'intérêt du partenaire ciblé à engager une collaboration. Aussi, **le COR appelle l'ensemble**

**des acteurs concernés, et en premier lieu les pouvoirs publics et les industriels, à faciliter autant que possible le partage d'information et la mise en place d'initiatives communes.** Pour cela, la mobilisation de dispositifs tels que les programmes et équipements prioritaires de recherche<sup>4</sup> (PEPR) serait probablement d'une aide notable et **la création d'un PEPR « nucléaire et climat » pourrait être un objectif à envisager à l'issue d'une première phase de travaux.**

Face à une incertitude croissante, le COR note qu'élargir de façon raisonnée le périmètre des parties prenantes impliquées dans la programmation et la production de recherche peut renforcer la qualité des choix mais aussi la confiance sociale dans le système de sûreté nucléaire et de radioprotection. L'ouverture aux parties prenantes peut également constituer une des conditions de la résilience et de l'efficacité du système. Une telle démarche peut aussi être favorable à la production de connaissances à visée transformative, de « connaissances actionnables » par toutes les parties prenantes. A ce sujet, le COR voit un intérêt au développement des processus de coopération directe avec les salariés des exploitants de sites nucléaires, comme avec l'ensemble des professionnels et populations directement concernés.

### **Recommandation 3 : Investiguer le champ de la scénarisation et des approches narratives pour appréhender des situations complexes et/ou imprévisibles<sup>5</sup>**

Comme évoqué en commentaire général, le GT a identifié la question des incertitudes, de l'imprévisibilité et des conjonctions possibles d'événements comme constituant un défi majeur pour évaluer les conséquences des changements climatiques sur les activités nucléaires. Face à ce défi, le COR considère nécessaire d'explorer des voies méthodologiques nouvelles et identifie les approches dites narratives<sup>6</sup> comme plus particulièrement intéressantes à investiguer dans ce cadre.

Une première déclinaison possible consiste à cibler les vulnérabilités des installations à l'aide de scénarios permettant d'éprouver la robustesse des dispositions techniques et organisationnelles. Cette démarche, pour partie mise en œuvre à l'occasion des évaluations complémentaires de sûreté post-Fukushima, correspond aussi à celle qualifiée de *stress test* dans l'étude Futurs énergétiques 2050 de RTE et de *storyline* dans le sixième rapport d'évaluation du GIEC. L'intérêt de ce type de démarche est de mettre l'accent sur la compréhension des facteurs impliqués et leur plausibilité plutôt que sur un jugement du caractère « probable » de la séquence envisagée. Elle conduit ainsi à étudier des événements ou séquences d'événements observés dans le passé ou jugés physiquement possibles y compris lorsque les connaissances actuelles ne permettent pas d'en estimer avec précision la vraisemblance.

Une seconde déclinaison consiste à repenser les enjeux de sûreté et de radioprotection dans le cadre d'une démarche d'analyse prospective. Par cette démarche, il s'agit de dépasser les méthodes reposant sur des outils de simulation ou sur des modèles statistiques pour intégrer des paramètres et événements difficiles à objectiver à l'aide de méthodes quantitatives prédictives. Le recours au récit et au scénario permet ainsi de se placer dans un cadre systémique et d'aborder des situations complexes impliquant simultanément des combinaisons d'événements météorologiques, la défaillance de réseaux ou de collectifs de travail, des conflits d'usage liés à l'accès aux ressources en eau...

**Le COR recommande à l'IRSN de soutenir l'expérimentation et le développement de méthodes basées sur des scénarios et des approches narratives afin, d'une part, de mieux appréhender des situations complexes ou imprévisibles susceptibles d'impacter la sûreté ou la radioprotection et, d'autre part, d'offrir un cadre de réflexion systémique complémentaire aux approches classiques, disciplinaires et sectorisées.**

Les plus-values attendues de ces développements méthodologiques sont notamment :

---

<sup>4</sup> Les PEPR (Programmes et équipements prioritaires de recherche) sont une action du plan France 2030 pour le financement de la recherche fondamentale au service des stratégies d'accélération. L'objectif est de construire et consolider un leadership français dans les domaines stratégiques pour son économie et sa souveraineté, comme la technologie, l'économie, la société, l'environnement... Les PEPR exploratoires visent plus spécifiquement l'accompagnement de transformations émergentes.

<sup>5</sup> Le terme imprévisible est utilisé ici en référence au concept développé par Nassim Nicholas Taleb dans son ouvrage *Le Cygne noir, la puissance de l'imprévisible*.

<sup>6</sup> Les approches narratives ou storylines reposent sur l'enchaînement ou la combinaison d'événements physiquement plausibles qui peuvent être définis de différentes façons (en recourant à des événements passés, à des trajectoires futures issues de simulations, à de la fiction, etc.). Différents termes sont utilisés selon les cadres d'études et le caractère plus ou moins précis et quantifiés des situations décrites (voir à ce sujet le rapport de l'ONERC de 2022 « La prospective au service de l'adaptation au changement climatique » ou le projet européen [RECEIPT](#)).

- de renforcer la robustesse des référentiels de sûreté actuels et d'explorer d'éventuels effets faibles, en recherchant et analysant l'impact de séquences physiquement plausibles ;
- d'anticiper des contextes dégradés tenant compte de la dimension systémique des impacts climatiques pour entraîner les acteurs de la sûreté nucléaire, dont l'IRSN, à y faire face ;
- de faciliter la mise en cohérence des hypothèses retenues pour évaluer les conséquences des changements climatiques sur la sûreté et la radioprotection et de celles issues des exercices prospectifs sectoriels et des plans d'adaptation territoriaux (mix électrique, disponibilité du parc, modulation, disponibilité et usages des ressources en eau, etc.).

#### **Recommandation 4 : mobiliser les sciences humaines et sociales pour explorer les impacts organisationnels et humains et renforcer les stratégies d'adaptation**

La sûreté nucléaire et la radioprotection reposent sur des considérations et des éléments matériels et techniques mais également sur des comportements individuels et des organisations. Le COR considère que les enjeux liés à ces facteurs « dits » humains ne peuvent être considérés comme contingents. Les conditions humaines (individuelles et collectives) d'exercice des fonctions de sûreté et de radioprotection conditionnent leur bon déroulement.

Les incidences négatives d'épisodes caniculaires sur la santé humaine et le bien-être des personnes sont aujourd'hui bien documentées<sup>7</sup>. La survenue d'événements météorologiques extrêmes (inondations, sécheresses, incendies...) peut par ailleurs générer des pathologies traumatiques. Ces impacts sanitaires et psychologiques peuvent altérer la vigilance ou la capacité de réaction d'opérateurs en situation de travail et affecter la sûreté. Ils nécessitent donc d'être pris en compte dans les stratégies d'adaptation des activités nucléaires aux changements climatiques. Il convient pour cela de comprendre la nature et les manifestations de ces impacts humains et organisationnels, ce qui requiert un effort de développement des connaissances auquel l'IRSN peut et doit contribuer.

Les facteurs humains et organisationnels constituent un domaine de recherche déjà présent à l'IRSN. Il permet de développer des travaux au plus près des pratiques en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection et de couvrir les situations de fonctionnement normal mais également la gestion des situations de crise et la gouvernance des risques.

***Le COR recommande d'élargir les réflexions menées par l'IRSN dans le domaine des sciences humaines et sociales, de manière à couvrir les effets des changements climatiques sur les opérateurs en situation de travail, aux échelles individuelles et interindividuelles ainsi que collectives et institutionnelles.*** Il souligne que ces orientations de recherche s'inscrivent pour partie dans la continuité de celles formulées par le COR dans son avis relatif aux compétences et doivent être articulées avec elles. Comme évoqué dans cet avis, la mise en place d'un cadre collaboratif associant l'IRSN aux exploitants d'installations nucléaires et à des partenaires académiques apparaît indispensable.

**Le COR considère le développement de recherches relatives aux savoirs et apprentissages collectifs tout particulièrement important.** Plusieurs contributeurs au séminaire du 20 octobre 2022 ont pointé les déficits dans ce champ. Aussi, il sera utile de s'intéresser autant aux effets perturbateurs de périodes de canicules sur les comportements individuels et collectifs, qu'aux capacités de réaction face à une crise s'ajoutant à d'autres événements catastrophiques.

Enfin, les réflexions menées par le GT ont conduit à évoquer l'hypothèse que les changements climatiques puissent provoquer une instabilité pouvant aller jusqu'à un délitement des institutions. Cette perspective a conduit à s'interroger sur les caractéristiques des organisations les plus à même de s'adapter à des désordres et déstabilisations successifs. À cette occasion, les capacités adaptatives des institutions fondées sur une gouvernance souple et décentralisée, cultivant une forte diversité en leur sein, ont été mises en avant. Bien que cette question puisse sembler éloignée du cœur des missions de l'IRSN, **le COR considère utile d'étendre les recherches de l'Institut en matière de gouvernance des risques pour y intégrer les questions de gouvernance adaptative** – certains intervenants ayant évoqué des notions comme celle de « chaos adaptatif ». La mutualisation de ces réflexions avec des organismes pairs tels que

<sup>7</sup> Voir notamment le rapport de synthèse du 6<sup>ème</sup> rapport d'évaluation du GIEC.

l'Ineris ou au sein de cercles académiques plus larges, dans le cadre du PEPR IRiMa<sup>8</sup> par exemple, serait à envisager.

Le retour d'expérience apparaît également un enjeu majeur pour le COR. Or, les échanges intervenus lors du séminaire du 20 octobre 2022 suggèrent que la « métabolisation » des informations issues des dispositifs de retour d'expérience n'est pas complètement ni systématiquement satisfaisante. Certains interlocuteurs ont même évoqué des risques réguliers de tendance à « l'oubli institutionnel ». Aussi, **le COR invite l'IRSN à conduire un travail permettant d'en repérer les faiblesses et les impensés.** Le retour d'expérience apporte également une base de connaissance précieuse pour travailler certains signaux faibles, possibles précurseurs d'effets indirects des changements climatiques. **L'exploitant étant l'observateur le mieux placé pour déceler et tracer ces signaux faibles, c'est avec lui qu'il revient de les collecter en vue d'alimenter des travaux de recherche.**

### **Recommandation 5 : développer l'implication de l'IRSN auprès des producteurs de données climatiques**

Un des fondements de la sûreté nucléaire repose sur la protection des installations contre les agressions externes de toutes natures. Pour justifier l'adéquation de cette protection, il est nécessaire de définir et d'évaluer les niveaux d'aléas dont on cherche à se prémunir. La démarche traditionnellement employée pour cela est fondée sur le recueil d'observations d'événements passés et sur leur exploitation statistique. Pour ce qui concerne les aléas météorologiques et hydrologiques, le groupe de travail note que les changements climatiques conduisent à réinterroger cette démarche en remettant en cause le principe de stationnarité : pour déterminer la fréquence et l'ampleur des événements extrêmes auxquels s'attendre au cours des prochaines décennies, exploiter les seules données d'observation disponibles ne peut désormais suffire.

Une voie possible pour lever cette difficulté consiste à évaluer les aléas futurs en complétant les données d'observation par les résultats fournis par les modèles climatiques. Le développement rapide des sciences du climat rend aujourd'hui une telle démarche envisageable. Un travail significatif reste néanmoins à accomplir pour disposer de jeux de données météorologiques et hydrologiques issues de simulations, adaptés à l'estimation des niveaux d'aléas extrêmes retenus dans les évaluations de sûreté, à l'échelle de chacun des sites nucléaires français.

Ce travail nécessite une mobilisation des compétences et des outils de la communauté des sciences du climat et la mise en place d'une collaboration étroite et dans la durée entre l'IRSN et les acteurs du nucléaire.

Aussi, **le COR recommande que l'IRSN développe son implication auprès des producteurs de données climatiques.**

Le COR invite ainsi l'IRSN à poursuivre voire à intensifier ses collaborations scientifiques avec les équipes de modélisation du climat. Il l'encourage plus particulièrement **à développer ses relations avec Météo France et l'IPSL et à étudier les formes de partenariat les plus adaptées avec ces organismes** (financement de projets de recherche ciblés, équipe commune de recherche, détachement de salariés IRSN, etc.).

Le COR encourage également l'IRSN à **s'impliquer dans les projets et programmes visant à développer des services climatiques.** Cette implication doit permettre à l'IRSN de faire connaître ses besoins spécifiques et d'en obtenir la bonne prise en compte mais aussi de disposer d'un savoir-faire opérationnel dans l'analyse et le traitement des données issus des projections climatiques. Le projet *Explore 2*, piloté par l'Inrae et consacré à l'évaluation de l'impact des évolutions climatiques sur l'hydrologie (eaux de surface et souterraines), et le programme TRACCS<sup>9</sup>, destiné au développement des modèles climatiques au service des utilisateurs de données, apparaissent de ce point de vue tout particulièrement intéressants.

---

<sup>8</sup> Le PEPR exploratoire IRiMa a pour objectif de formaliser une « science du risque » pour contribuer à l'élaboration d'une nouvelle stratégie de gestion des risques et des catastrophes et leurs impacts dans un contexte de changements globaux (cf. <https://www.insu.cnrs.fr/fr/PEPR-IRIMA> ou <https://www.brgm.fr/fr/programme/irima-programme-national-structurer-renforcer-science-risque-france>).

<sup>9</sup> TRACCS - Transformer la modélisation du climat pour les services climatiques - est un programme lauréat, en juillet 2022, de la deuxième vague de l'appel à projet relatif aux programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR) exploratoires. Il est piloté par le CNRS et Météo France.



**Recommandation 6 :** Evaluer les impacts environnementaux des installations nucléaires en tenant compte de l'évolution des socio-écosystèmes territoriaux sous l'influence des changements climatiques

Les changements climatiques modifient déjà et vont plus encore modifier les caractéristiques écologiques des territoires autour des sites nucléaires. Ces modifications concernent les zones naturelles, la flore et la faune qu'elles abritent mais aussi les zones cultivées, les productions agricoles, la chaîne alimentaire et, d'une manière plus générale, ce qui est qualifié de socio-écosystème dans les travaux en écologie. Elles conduisent à réinterroger la manière d'évaluer les impacts environnementaux des sites et installations nucléaires.

Aussi, *le COR recommande d'aborder la question des impacts des installations nucléaires sur la population et l'environnement à partir d'une analyse préalable de l'évolution des socio-écosystèmes des territoires concernés sous l'effet des changements climatiques.*

Le COR note que ce type d'analyse a déjà été engagé sur plusieurs territoires dans le cadre de diagnostics de vulnérabilité climatique et de l'élaboration de politiques d'adaptation. C'est par exemple le cas de la région Nouvelle Aquitaine au travers du projet AcclimaTerra<sup>10</sup>. Il conviendrait que l'IRSN **recense les initiatives existantes sur les territoires hébergeant des activités nucléaires, afin d'exploiter leurs résultats pour décrire les socio-écosystèmes** à considérer aux horizons temporels pertinents (typiquement 2030, 2050, voire 2100 selon la nature des installations concernées et leur durée d'exploitation).

A partir de cette description, il conviendrait ensuite de **s'assurer de la disponibilité des connaissances nécessaires pour évaluer les impacts auxquels ces socio-écosystèmes seront soumis**, notamment en cas d'accident, et le cas échéant de mettre en place les travaux permettant de les compléter. Pour ce qui concerne les écosystèmes, l'existence d'un stress climatique grandissant peut par exemple affecter les conditions de vie et de santé des communautés écologiques et modifier leur capacité de réponse à un stress radiologique. Ce contexte conduit à **encourager l'étude des effets multi-stress ainsi que l'étude des mécanismes adaptatifs et évolutifs** récemment initiées par les équipes de l'IRSN.

De manière plus générale, la description des socio-écosystèmes représentatifs des climats futurs sur chaque territoire peut alimenter le développement d'approches par scénarios évoquées à la recommandation n°3 et les réflexions de nature systémique. Les modifications des socio-écosystèmes peuvent en effet avoir des répercussions directes ou indirectes sur la sûreté via, par exemple, l'augmentation des risques d'incendie et la survenue d'épisodes de prolifération d'espèces animales ou végétales dans les fleuves ou la mer, susceptibles d'obstruer les prises d'eau des installations nucléaires. Plus largement, la question se pose de l'adaptation aux changements climatiques des territoires et de leurs caractéristiques naturelles ou humaines (massifs forestiers, cours d'eau, ponts, routes, réseaux, écoles...), et de l'interdépendance ou des influences de cette adaptation avec les sites nucléaires présents sur ces territoires.

Les épisodes de sécheresse, dont la fréquence et la sévérité ne peut que s'amplifier, seront par exemple une source grandissante de conflits d'usage dans la gestion des ressources en eau. Bien que la résolution de ce type de situation n'entre pas directement dans ses missions, l'IRSN peut être questionné en cas de conflit sévère impliquant le fonctionnement de réacteurs nucléaires ou sur la conception et l'adaptabilité des futures installations en rivière. Pour répondre au mieux, l'IRSN doit acquérir une connaissance fine de l'environnement, du climat local, des activités qui s'y déroulent et des besoins qui en découlent, mais aussi de leur évolution possible dans le temps long. Cette acquisition peut se faire dans le cadre de partenariats avec des institutions et les acteurs locaux concernés.

**Recommandation 7 :** Réaliser un état des connaissances de l'impact thermique du parc électronucléaire sur les cours d'eau et identifier les éventuelles questions de recherche encore nécessaires à développer

Les impacts thermiques des centrales sont encadrés règlementairement par la fixation de limites de température définies dans les arrêtés relatifs aux rejets et prélèvements d'eau. Les limites fixées sont établies en fonction d'un objectif de protection des écosystèmes aquatiques. Avec l'augmentation des températures des cours d'eau entraînée par les changements climatiques, le respect des prescriptions fixées dans les arrêtés devient un sujet d'intérêt grandissant voire de débat. La recrudescence d'épisodes

---

<sup>10</sup> <https://www.acclimaterra.fr/>.

caniculaires, parfois combinés à des niveaux d'étiage sévère, conduit en effet de manière plus fréquente au dépassement des valeurs prescrites. Lorsque la réponse à la demande électrique et la préservation de l'équilibre du réseau le justifient, RTE peut requérir le maintien du fonctionnement ou de la puissance de production de réacteurs, en activant un dispositif dérogatoire. La mise en œuvre des dérogations s'accompagne de dispositions particulières de surveillance destinées à vérifier l'absence d'impact réel sur les écosystèmes.

L'obligation de procéder à un arbitrage entre la sécurité d'approvisionnement électrique et le respect de limites de protection des milieux conduit à s'interroger sur les fondements scientifiques et techniques sur lesquels reposent les limites et les décisions de déroger à leur application. Le COR note que cette question suscite aujourd'hui une attention particulière comme l'illustre le récent rapport de la cour des comptes relatif à l'adaptation au changement climatique du parc des réacteurs nucléaires<sup>11</sup> qui la place au cœur d'une de ses six recommandations. Elle n'est toutefois pas explicitement abordée par l'IRSN dans ses travaux de recherche et ses évaluations.

**Compte tenu du contexte précédent, le COR recommande la réalisation d'un état des connaissances disponibles pour juger de l'impact des rejets thermiques des centrales nucléaires sur les cours d'eau et la définition des questions éventuelles sur lesquelles des travaux de recherche sont encore nécessaires.** Soulignant l'intérêt de disposer au sein d'un même organisme d'une vision globale des impacts associés à l'exploitation des installations nucléaires quelle qu'en soit la nature, certains membres du COR considèrent que l'IRSN devrait être directement impliqué dans les réflexions aux côtés des organismes référents dans le domaine que sont l'Inrae, l'Office Français de la Biodiversité et EDF en particulier.

#### **Recommandation 8 : Approfondir la connaissance des impacts de l'évolution du paysage énergétique sur la sûreté nucléaire**

La transformation en cours du paysage énergétique constitue un élément de contexte important pour le fonctionnement des installations nucléaires. Dans le futur, le parc nucléaire pourrait en effet être amené à jouer un plus grand rôle dans le maintien de l'équilibre du réseau électrique, en ajustant sa puissance en fonction des variations de la demande mais aussi des fluctuations de la production d'énergie renouvelable.

***Le COR recommande de mener une réflexion approfondie afin de saisir toutes les implications, en termes de sûreté et de radioprotection en particulier, de l'évolution du paysage et du mix électrique en cours.***

Il conviendrait en particulier de mieux **analyser les impacts de ces évolutions sur la modification potentielle des cycles de fonctionnement des réacteurs** et leur incidence sur le régime de sollicitation de certains matériaux et équipements, et éventuellement sur les caractéristiques des assemblages combustibles.

Le COR considère également utile d'**examiner les conséquences qui pourraient résulter d'une plus grande fragilité du réseau électrique**, en envisageant par exemple des scénarios de perte d'alimentation électrique aggravés par rapport à ceux considérés aujourd'hui (durée plus importante, perte de réseau affectant plusieurs centrales...).

De façon générale, le COR souligne l'intérêt de disposer d'une bonne compréhension du mix électrique et de ses conséquences sur le fonctionnement du parc nucléaire. Pour ce faire, il **encourage l'IRSN à se rapprocher de RTE**. Une collaboration plus étroite entre les deux organismes pourrait notamment permettre de mieux prendre en compte les enjeux de sûreté et de radioprotection dans l'élaboration des scénarios du système électrique et ainsi d'en renforcer plus encore la crédibilité et la vraisemblance. Cette collaboration pourrait être également l'occasion d'harmoniser ou mutualiser les hypothèses et jeux de données utilisés en matière d'évolution climatique.

---

<sup>11</sup> La recommandation n°3 est formulée ainsi : « Consolider et mettre à jour les fondements scientifiques justifiant les limites réglementaires applicables aux rejets thermiques des réacteurs nucléaires (MTE, ASN, 2023) ».