Résilience des Centrales Nucléaires face aux Aléas Naturels

H. Cordier (EDF/DIPNN)

23 septembre 2021

Conférence SFEN – Rhône-Ain-Loire

©EDF – Christophe Gibbaud

CONTEXTE

RESILIENCE AUX EVENEMENTS EXTREMES

RESILIENCE AUX EVOLUTIONS « LENTES »

CONCLUSIONS

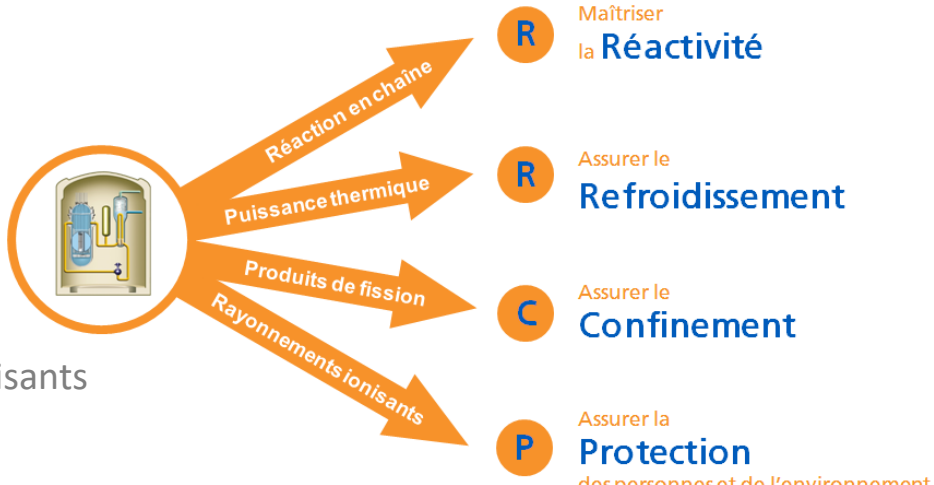
CONTEXTE

RESILIENCE AUX EVENEMENTS EXTREMES

RESILIENCE AUX EVOLUTIONS « LENTES »

CONCLUSIONS

Produire de l'Electricité en toute Sûreté…



1. **Assurer la Sûreté des installations nucléaires**
   - Contrôler la réactivité
   - Evacuer la puissance résiduelle
   - Confiner les substances radiologiques.
   - Protéger les personnes et l'environnement contre les rayonnements ionisants
2. **Produire de l'Electricité**
   - En respectant les contraintes environnementales : arrêtés de rejets (thermiques, chimiques, radiologiques), …
   - En respectant les contraintes liées au fonctionnement des installations et celles liées aux personnels,

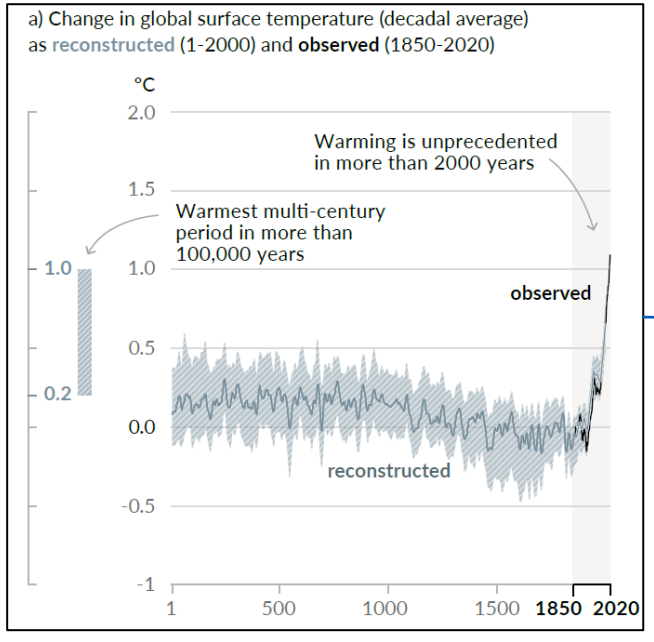
« …*contre vents et marées…* »

Produire de l'électricité en toute sûreté…

- **A la conception, la protection des installations face aux aléas (naturels ou d'origine humaine) est prise en compte.**
- **Les dispositions de protection évoluent régulièrement pour prendre en compte l'évolution des risques (ex. : changement climatique, …) et le retour d'expérience (ex. : Tempête en 1999, …).**
- **En suivant des principes généraux…**
  - Priorité de la sûreté face à la production d'électricité !
  - Respect de l'environnement (limitation des impacts, réglementation environnementale, …)
  - Garantie de la robustesse de l'installation pour des intensités d'aléas bien supérieurs à ceux limitant la production d'électricité

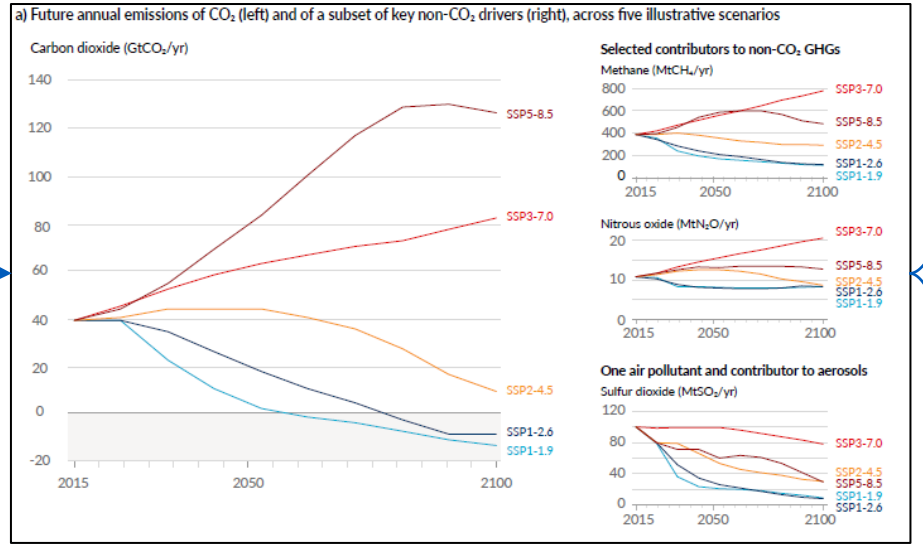
Changement Climatique

1. Observations du passé

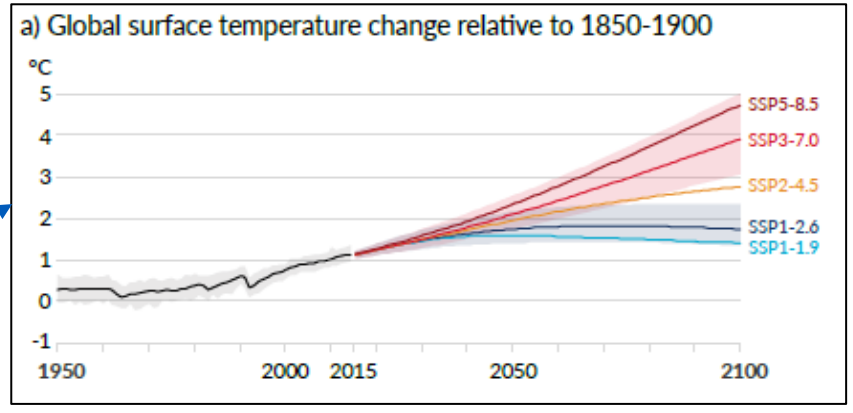


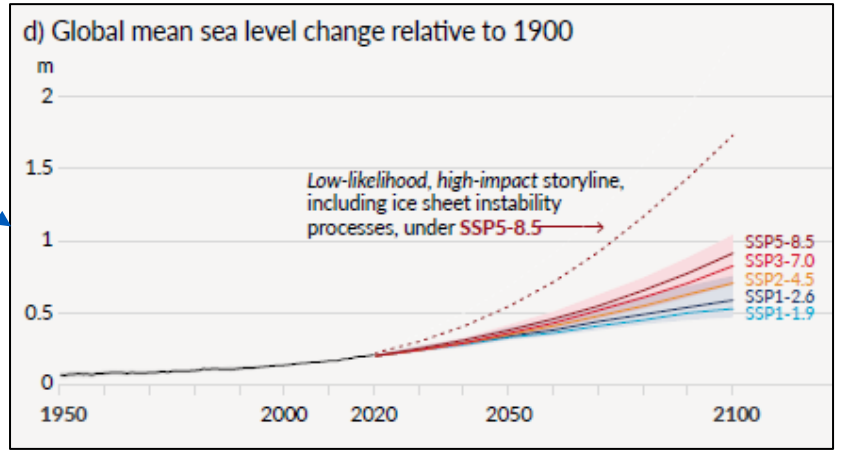
Source : IPCC (www.ipcc.ch)

2. Scenarii de référence à horizon 2100

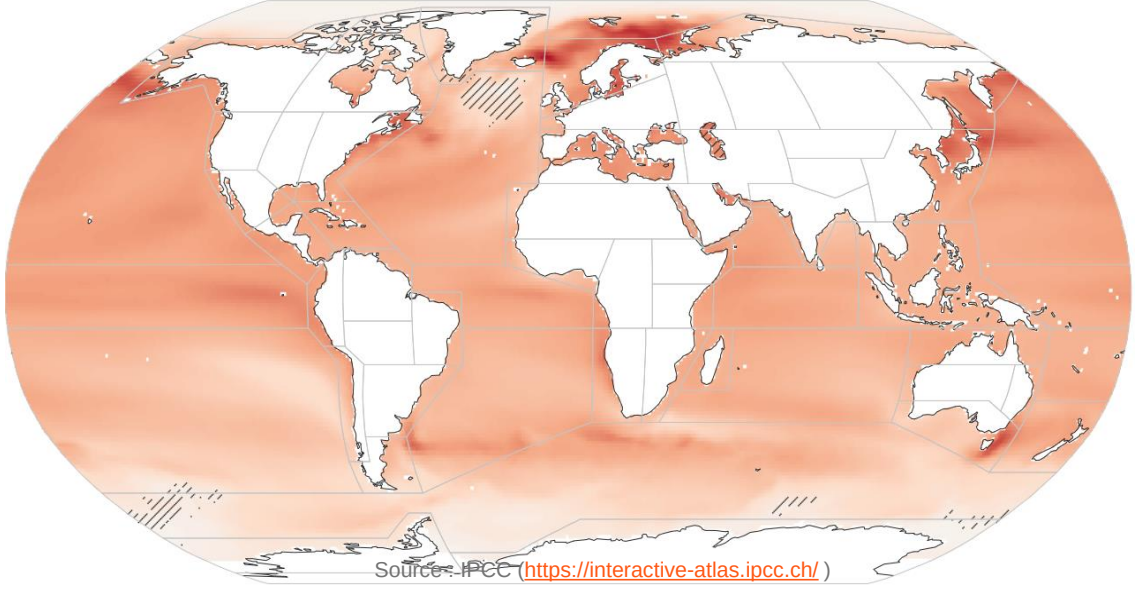


3. Conséquences globales



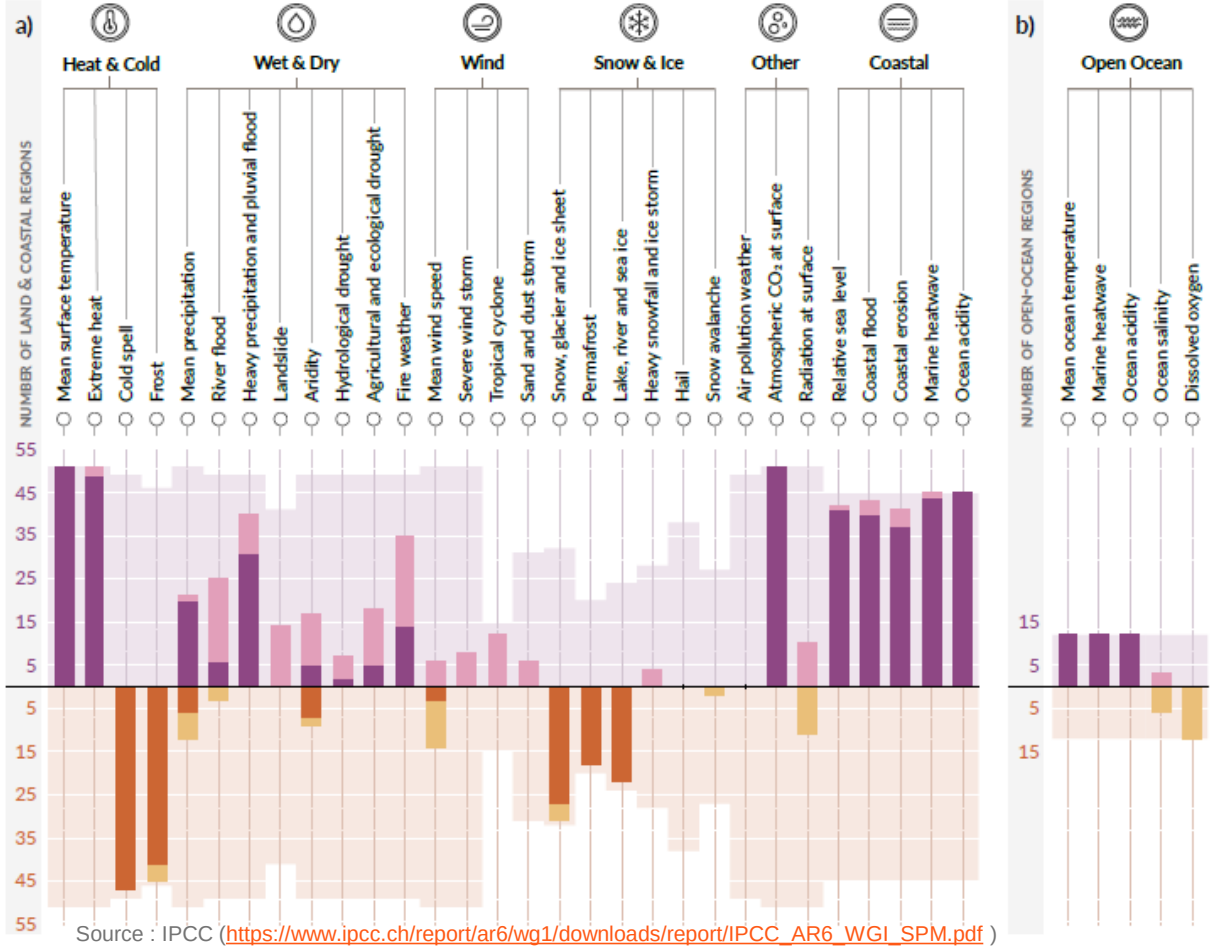


Changement Climatique : Impacts probables par zones



Source : IPCC (https://interactive-atlas.ipcc.ch/)

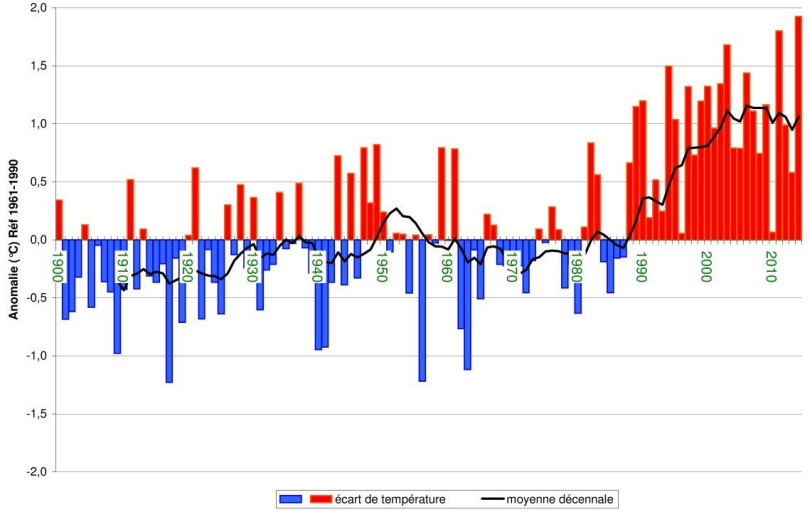
Number of land & coastal regions (a) and open-ocean regions (b) where each climatic impact-driver (CID) is projected to increase or decrease with *high confidence* (dark shade) or *medium confidence* (light shade)



Source : IPCC (https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf)

France : Evolution observée

- **Hausse des températures moyennes :**
  - 1900 à nos jours → +1,7°C en moyenne (vs. : +0,9°C à l'échelle mondiale sur la période 1901-2012.
- **Evolution contrastée des précipitations selon les régions et les saisons**
  - Tendances générales peu marquées (pour la plupart des régions)
  - Hausse du cumul de précipitations au printemps/automne sur l'ensemble du pays
  - Hausse du cumul annuel dans la moitié nord
  - Baisse du cumul annuel dans la moitié sud
- **Evolution de la fréquence et de l'intensité des évènements « extrêmes » :**
  - Augmentation du nombre de journées chaudes (> 25°C)
  - Diminution du nombre de jours de gel
  - Augmentation du nombre d'évènements de pluie intense

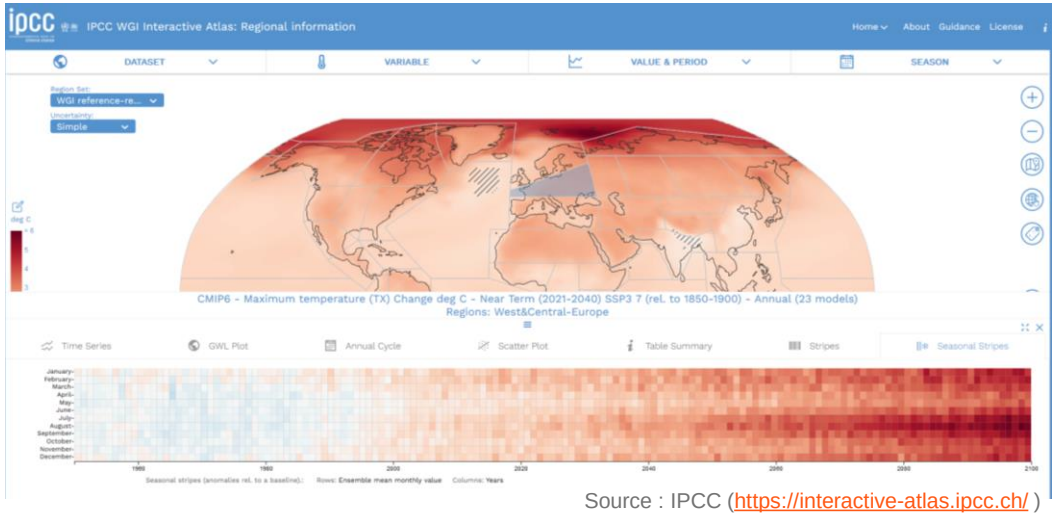


Anomalie de la température moyenne annuelle de l'air, en surface, par rapport à la normale de référence : température moyenne en France (l'indicateur est constitué de la moyenne des températures de 30 stations météorologiques. Le zéro correspond à la moyenne de l'indicateur sur la période 1961-1990, soit 11,8 °C).

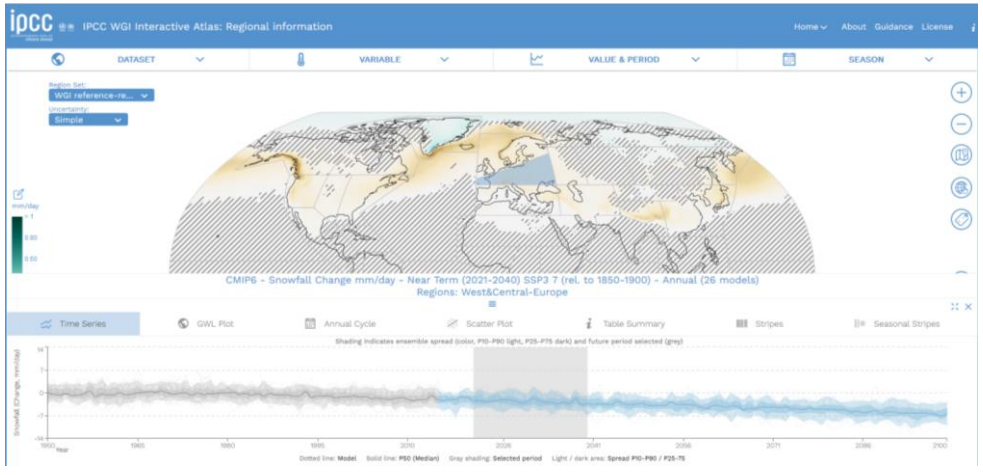
Source : MétéoFrance (http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/le-rechauffement-observe-a-l-echelle-du-globe-et-en-france)

France : Evolution probable

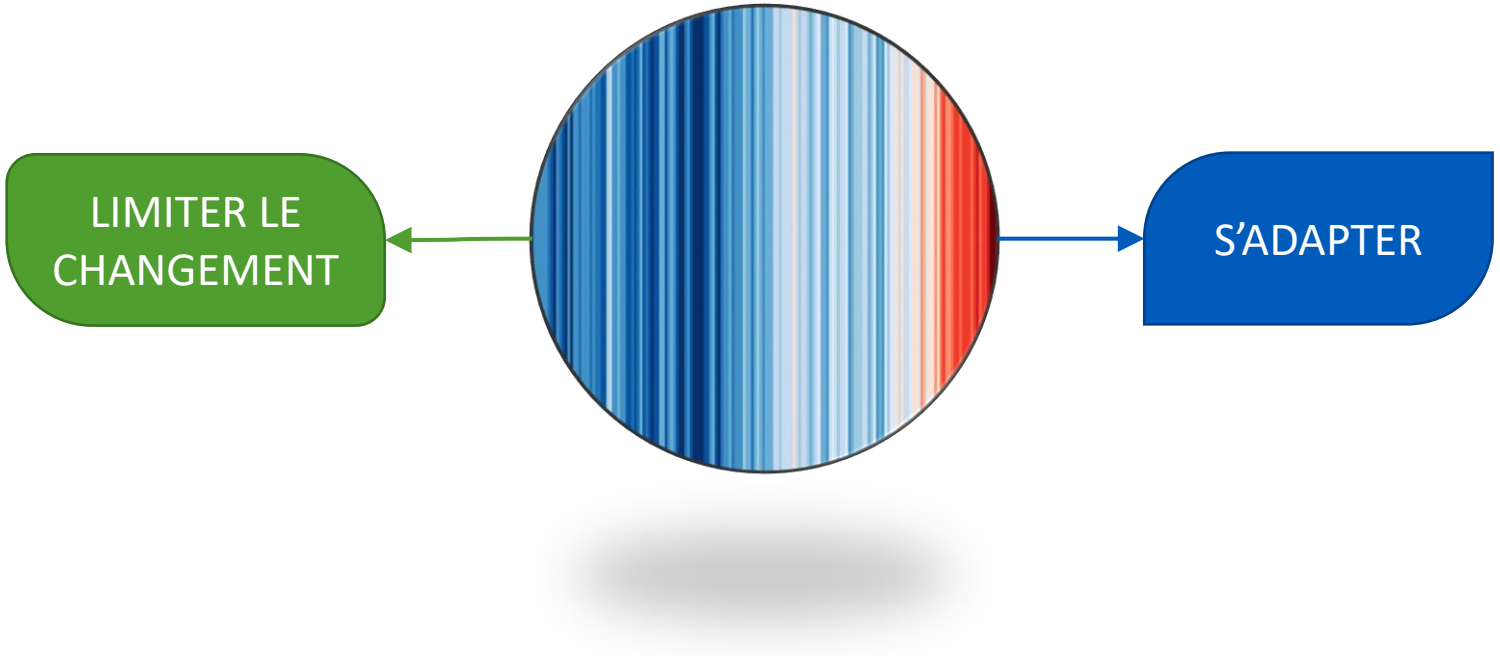
- **Hausse des températures moyennes :**
  - D'ici 2050 : entre +0,6°C et +1,3°C (+ forte dans le sud-est en été)
  - D'ici 2100 : de +0,9°C à +5,6°C selon les modèles considérés.
- **Augmentation du nombre de jours de vague de chaleur**
  - L'été 2003 deviendrait un été « normal » en 2100.
- **Augmentation du nombre d'épisodes pluvieux intenses**
- **Augmentation du nombre de jours sans pluie… mais avec des disparités fortes entre régions**
- **Diminution du nombre d'évènements intenses de froid**
- **…**



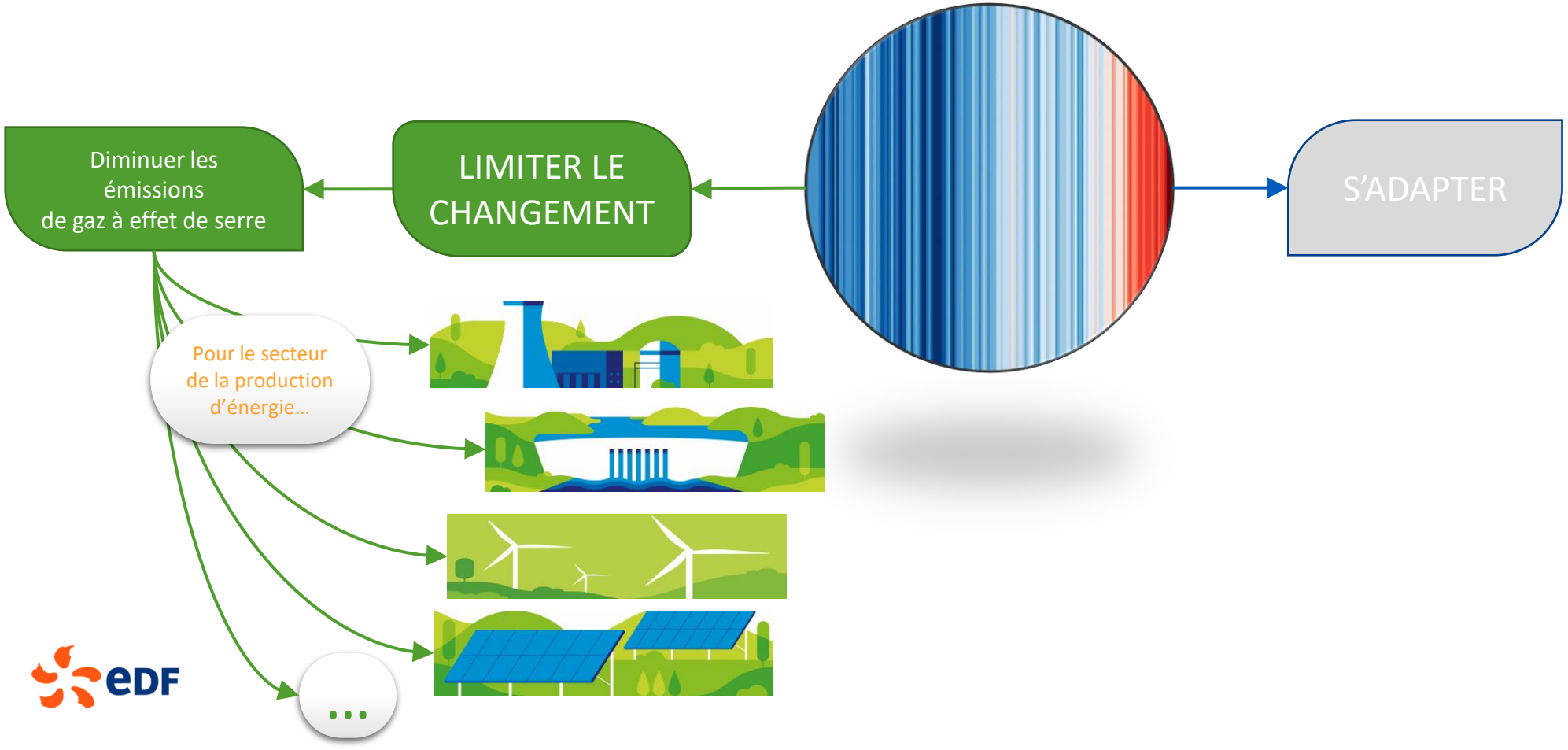
Source : IPCC (https://interactive-atlas.ipcc.ch/)



Limitation & Adaptation



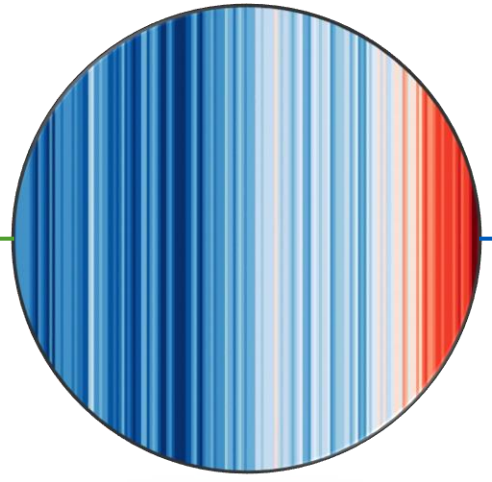
Limitation & Adaptation



Limitation & Adaptation

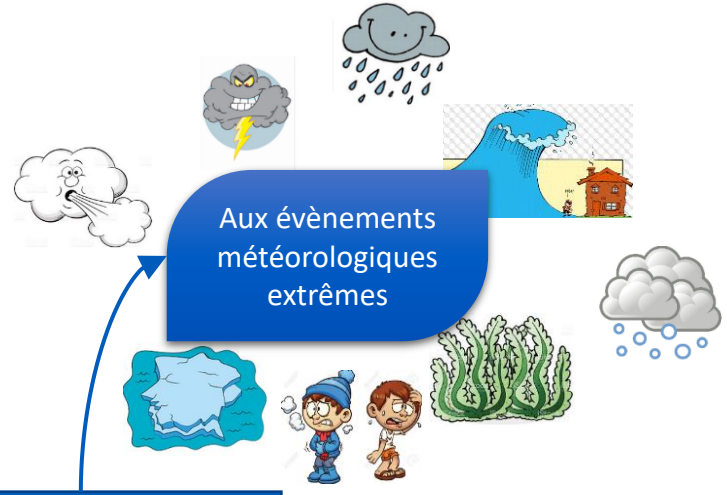
Diminuer les émissions de gaz à effet de serre

LIMITER LE CHANGEMENT



S'ADAPTER AU CHANGEMENT

Aux évènements météorologiques extrêmes



Aux évolutions progressives du climat

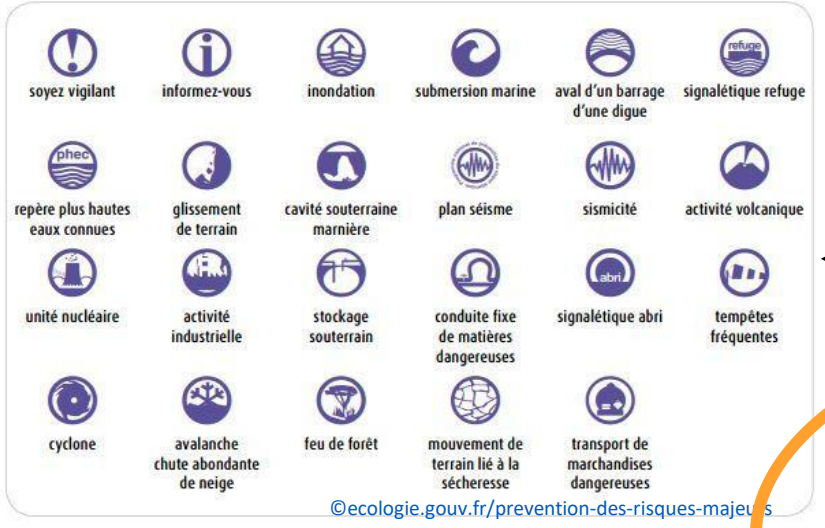
CONTEXTE

RESILIENCE AUX EVENEMENTS EXTREMES

RESILIENCE AUX EVOLUTIONS « LENTES »

CONCLUSIONS

2. RESILIENCE AUX EVENEMENTS EXTREMES



©ecologie.gouv.fr/prevention-des-risques-majeurs

1. Définir des objectifs et des principes de sûreté

2. Identifier les risques

3. Définir les niveaux d'aléas à retenir

Volet Déterministe

4.
Définir les « cibles de sûreté » à protéger

Volet Probabiliste (EPS)

4.
Analyse des impacts sur l'installation
Quantification du Risque

5.
Définir les moyens de protection & de suivi en exploitation

6. Suivre le REX et Faire les Réexamens de Sûreté

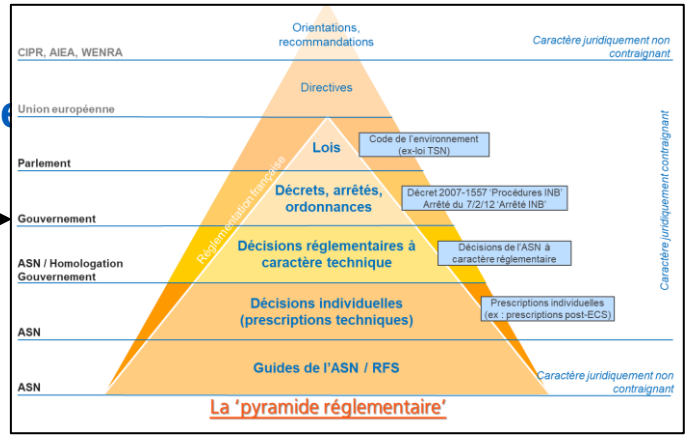
©wikipedia.fr

©EDF – Christophe Gibbaud

2. DEMARCHE DE PROTECTION – Etape 1 : Définir les objectifs et principes de

1. Définir des objectifs et des principes de sûreté

En tenant compte de la « pyramide réglementaire » :
- Contraintes internationales : AIEA, WENRA, …
- Contraintes nationales : arrêté INB, guides ASN, RFS, …



2. Identifier les risques

3. Définir les niveaux d'aléas à retenir

Volet Déterministe

4. Définir les « cibles de sûreté » à protéger

Volet Probabiliste (EPS)

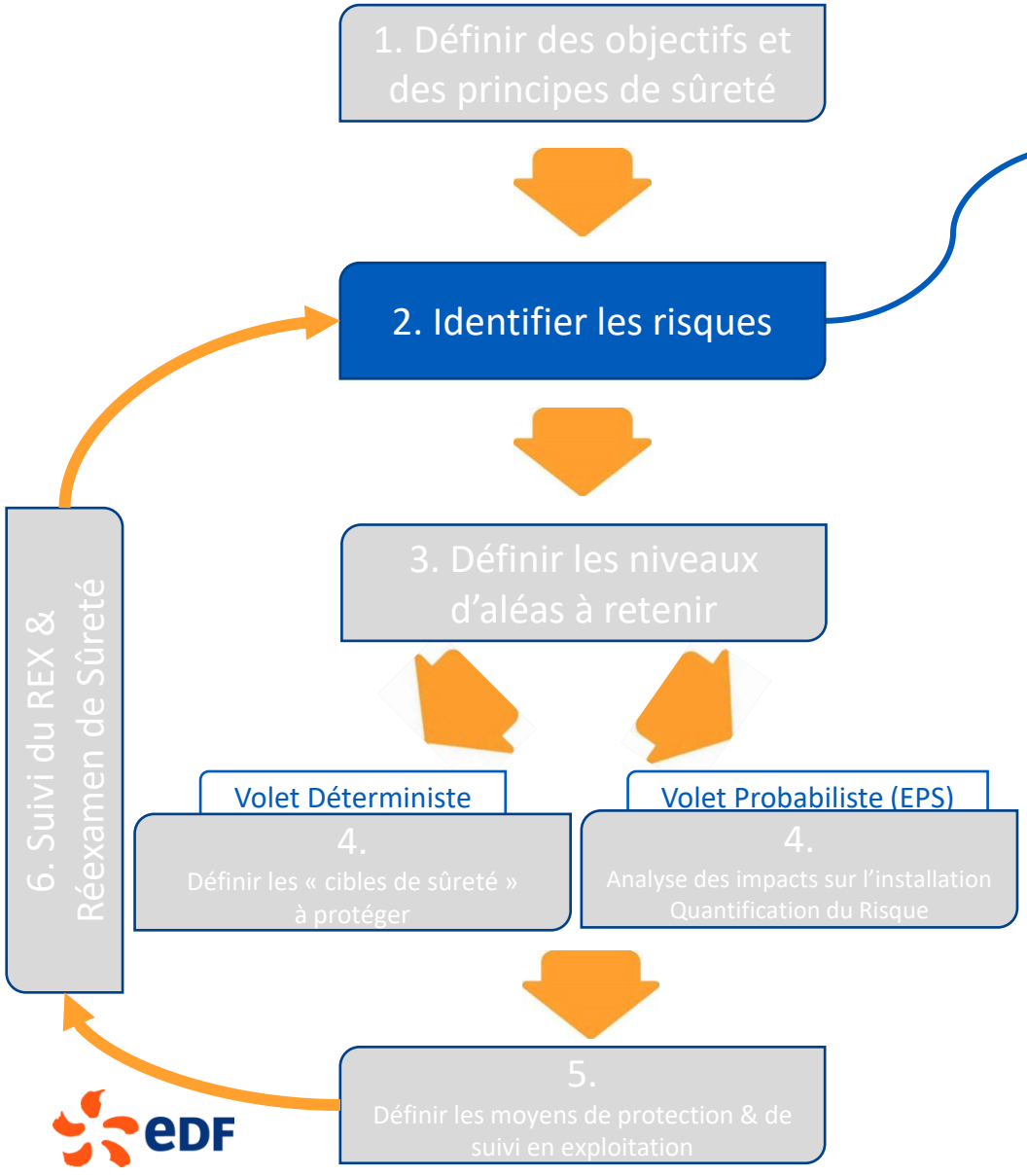
4. Analyse des impacts sur l'installation Quantification du Risque

5. Définir les moyens de protection & de suivi en exploitation

6. Suivi du REX & Réexamen de Sûreté

	Domaine de Référence	Domaine « Au-delà »
Objectifs de Sûreté	Absence de fusion du combustible & limitation des rejets	Maîtrise des rejets → Absence de mesures « long terme » de protection des populations
Concerne	Evènements uniques & Agressions plausibles (y/c cumuls)	Evènements plus complexes ou plus sévères
Volet Déterministe	Conservative : défaillance aléatoire, pénalisations des paramètres d'études, …	Adaptée : paramètres réalistes, …
Volet probabiliste	Hypothèses réalistes, approche « best-estimate », analyses de sensibilités sur les paramètres jugés pertinents	

2. DEMARCHE DE PROTECTION – Etape 2 : Identifier les risques



1. Identifier toutes les agressions potentielles → **2. Retenir les agressions possibles (pour l'installation concernée)** → **3. Identifier les effets potentiels**

IAEA

Western European WENRA Nuclear Regulators Association

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

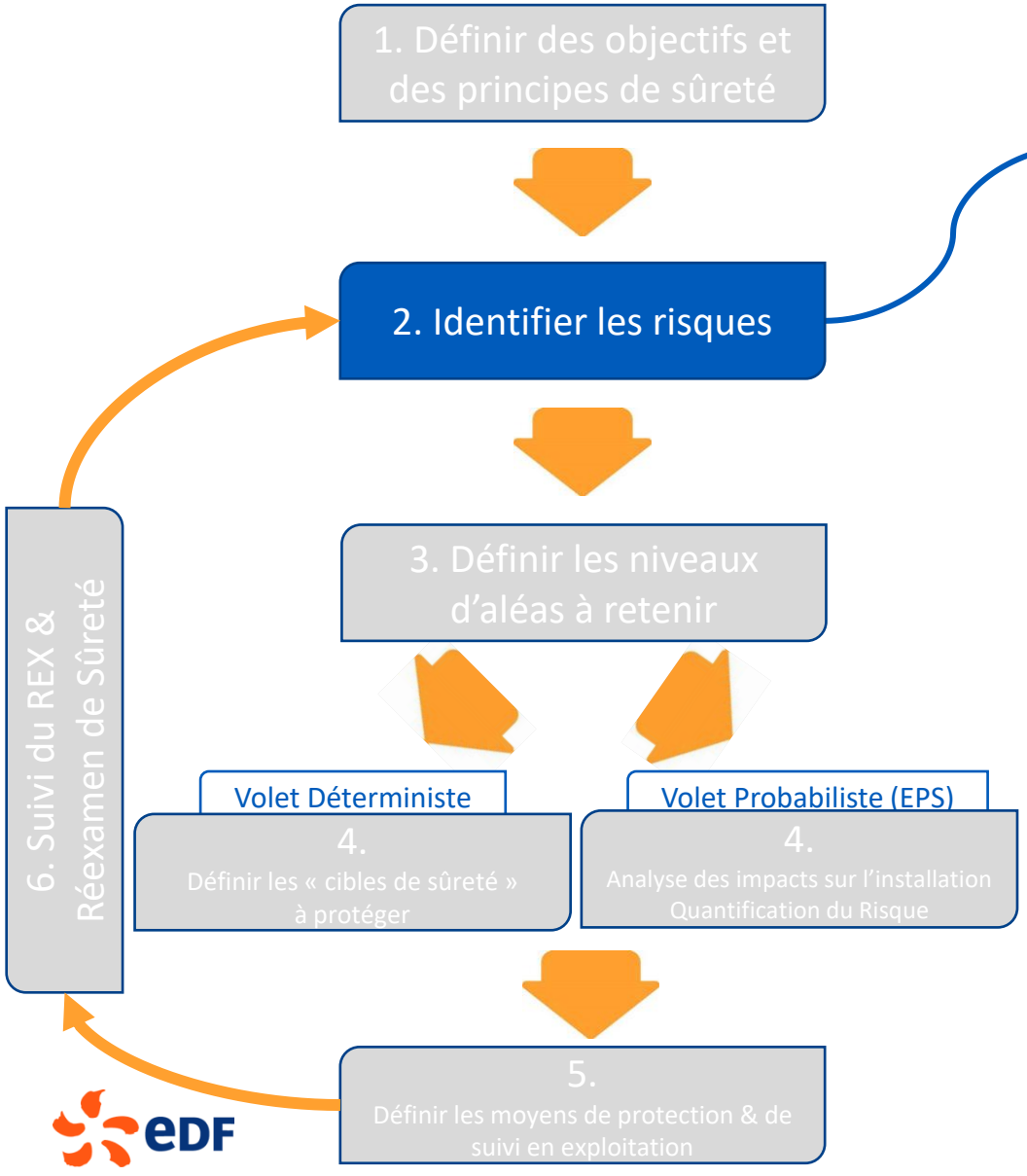
eDF

...

Category	Hazard
Seismotectonic	Ground motion
	Long period ground motion
	Liquefaction
	Dynamic compaction
	Tsunami
	Volcano (includes other effects than seismic)
	Meteorite (includes other effects than seismic)
Flooding	Extreme Rainfall (note links to other meteorological phenomena)
	Tidal Effects
	Storm Surge
	Seiche
	Tsunami
	Dam Failure
	Watercourse containment failure
	Wind generated waves
Meteorological	High Wind (Tornado, Hurricane, Cyclone Typhoon) and wind blown debris
	Extreme Drought
	Extremes of Air Temperature
	Extremes of Ground Temperature
	Extremes of Sea (or river) Temperature
	Lightning
	Snow (snow pack and snow melt)
	Icing
	Hail
	Humidity
	Air pressure
	Sandstorm, dust storm
	Saltspray/saltstorm
	Snow avalanche
	Waterspouts
	Ice flows / Frazil
	Mist/Fog
	Solar flares
Man Made	Accidental Aircraft Impact
	Gas Clouds (toxic, asphyxiates, flammables)

Category	Hazard
	Liquid Releases (flammables, toxic, radioactive)
	Fires
	Explosions (blast waves, missiles)
	Missiles (turbines, bottles BLEVE)
	Structural Failure
	Transport (road, sea, rail)
	Electromagnetic Interference
	Pipelines (Gas, Oil, Water)
	Vibrations
	Space Debris
	Flotsam/ Jetsam
	Log jam
	Pollution (ground or water course)
	Electrical Eddy currents into ground
	Military Activity (Accidental)
	Residual artefacts from previous use (i.e. munitions)
Biological	Seaweed
	Fish
	Jellyfish
	Marine growth
	Crustaceans, molluscs (shrimps, clams, mussels, shells)
	Birds
Infestation	Airborne swarms
	Infestation by rodents and other animals
Geological	Settlement
	Ground heave
	Mining (inactive or active)
	Caverns/ natural cavities
	Groundwater
	Leeching
	Contaminated land
	Landslides
	Radon
	Fissures
	Faults
	Soluble Rocks
	Unstable Soils (quick clays etc.)
	Permafrost

2. DEMARCHE DE PROTECTION – Etape 2 : Identifier les risques



1. Identifier toutes les agressions potentielles

2. Retenir les agressions possibles (pour l'installation concernée)

3. Identifier les effets potentiels

Agressions potentielles

- Canicule
- Sécheresse
- Grand Froid
- Avalanche
- Grand Froid + Vent fort
- Grand Froid + Glace
- Tornade
- Eruption volcanique
- …

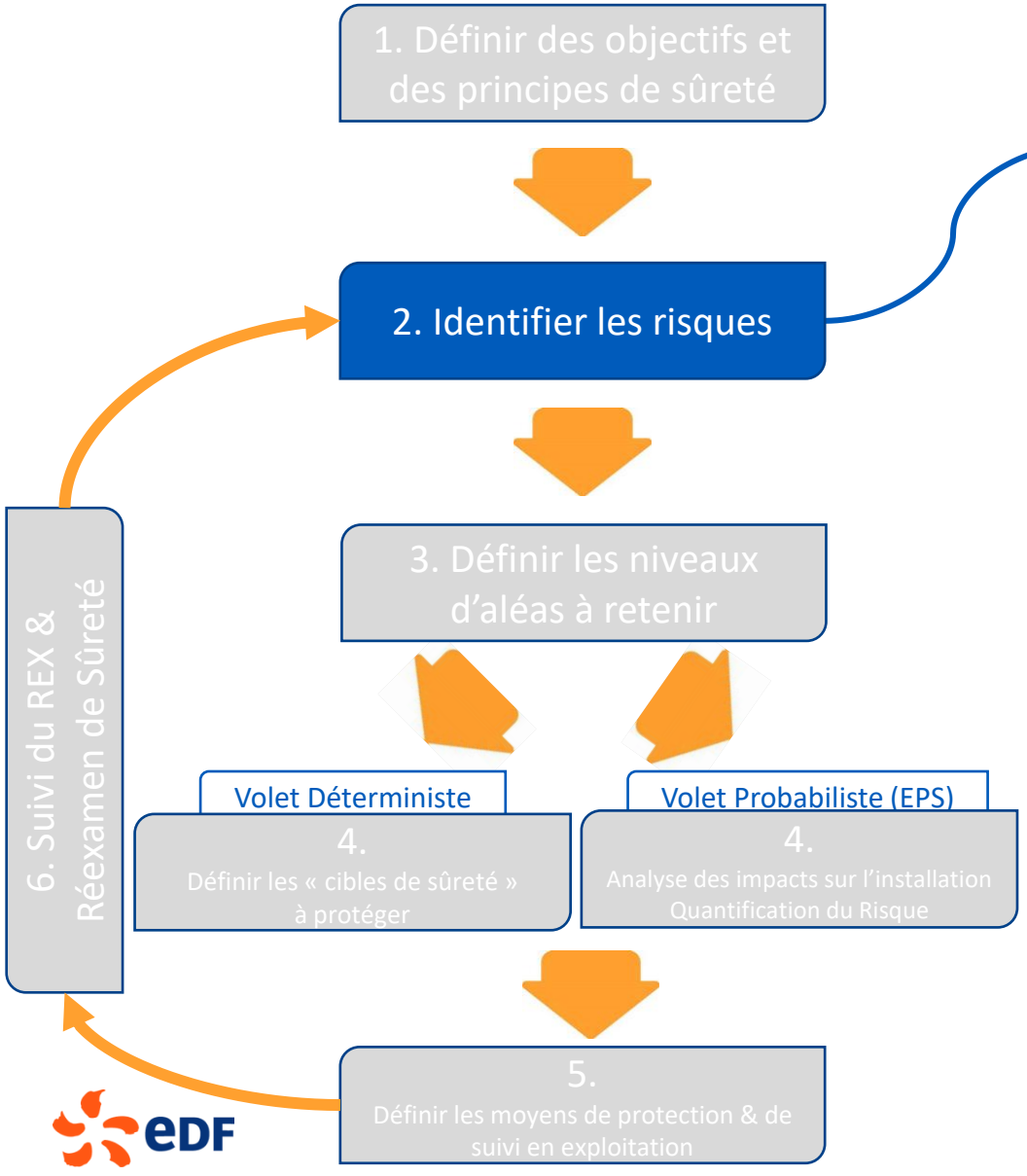
Critères d'élimination

- Phénomène impossible (en général ou sur le site considéré).
- Phénomène de trop faible probabilité.
- Phénomène couvert par d'autres agressions prises en compte.

Agressions prises en compte

- Canicule
- Sécheresse
- Grand Froid
- ~~Avalanche~~
- ~~Grand Froid + Vent fort~~
- Grand Froid + Glace
- Tornade
- ~~Eruption volcanique~~
- …

2. DEMARCHE DE PROTECTION – Etape 2 : Identifier les risques



1. Identifier toutes les agressions potentielles → 2. Retenir les agressions possibles (pour l'installation concernée) → **3. Identifier les effets potentiels**

- **Effets directs :**
  - Ce sont les effets directement créés par l'aléa considéré
  - Exemples :
    - Grand froid → température basse de l'air, température basse de l'eau.
    - Grand chaud → température d'air télevée, température d'eau élevée.
    - Tornade → Vent fort, variation de pression, faible pression d'air.
    - …
- **Effets indirects :**
  - Ce sont les conséquences potentiellement générées par les effets directs de l'aléa considéré
    - Température basse d'air → solidification de liquides dans des tuyaux, cristallisation du bore, …
    - Température basse d'eau → couvert de glace, frasil, …
    - Vent fort → Projectiles générés par ces vents, pression dynamique sur les structures, …
    - …

2. DEMARCHE DE PROTECTION – Etape 3 : Définir les niveaux d'aléas à retenir

1. Définir des objectifs et des principes de sûreté

2. Identifier les risques

3. Définir les niveaux d'aléas à retenir

Volet Déterministe

4. Définir les « cibles de sûreté » à protéger

Volet Probabiliste (EPS)

4. Analyse des impacts sur l'installation Quantification du Risque

5. Définir les moyens de protection & de suivi en exploitation

6. Suivi du REX & Réexamen de Sûreté

Volet Déterministe

Objectif

Assurer la robustesse des installations au moins pour des aléas de probabilité ~10^{-4} evnmt/an (càd: temps de retour ~10 000 ans)

Volet Probabiliste (EPS)

Objectif :

Faire tendre le risque de fusion du cœur toutes causes confondues vers l'objectif des réacteurs nucléaires de 3ème génération, càd vers quelques 10^{-5} /année.réacteur

Aléas définissables par un couple « Intensité vs. Probabilité »

(ex. : canicule, grand froid, grand vent, …)

- Codes & Normes
- Calculs statistiques + Marges
- Simulation numériques avancées
- …

Aléas pour lesquels l'évaluation d'une intensité liée à une probabilité n'est pas possible

(ex. : foudre, …)

- Consensus scientifique
- Approche « Maximum Credible Hazard »
- Scenario de référence
- …

2. DEMARCHE DE PROTECTION – Etape 4 : Volet Déterministe

1. Définir des objectifs et des principes de sûreté
2. Identifier les risques
3. Définir les niveaux d'aléas à retenir

Volet Déterministe

4. Définir les « cibles de sûreté » à protéger

Volet Probabiliste (EPS)

4. Analyse des impacts sur l'installation Quantification du Risque

5. Définir les moyens de protection & de suivi en exploitation

6. Suivi du REX & Réexamen de Sûreté

- **Structures, Systèmes et Composants (SSC) nécessaires à l'atteinte des objectifs de sûreté**

2. DEMARCHE DE PROTECTION – Etape 4 : Volet probabiliste

1. Définir des objectifs et des principes de sûreté

2. Identifier les risques

3. Définir les niveaux d'aléas à retenir

Volet Déterministe

4.
Définir les « cibles de sûreté » à protéger

Volet Probabiliste (EPS)

4.
Analyse des impacts sur l'installation
Quantification du Risque

5.
Définir les moyens de protection & de suivi en exploitation

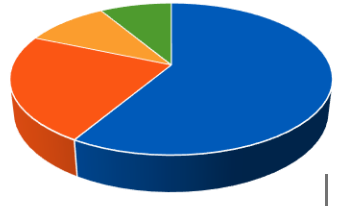
6. Suivi du REX & Réexamen de Sûreté

Analyse des impacts sur l'installation.

- **Liste des SSCs potentiellement impactés par l'agression suivant son intensité**
- **Liste des initiateurs potentiellement générés par l'agression suivant son intensité**

Analyse de la réponse de l'installation & Quantification du risque

- **Analyse fonctionnelle des initiateurs induits et des moyens de mitigation encore disponibles**
- **Quantification de la probabilité d'échec de la conduite et des moyens de mitigation (= risques de fusion du cœur et de rejets)**
- **Hiérarchisation des risques et enseignements apportés par le volet probabiliste**



2. DEMARCHE DE PROTECTION – Etape 5 : Définir les moyens de protection et de suivi en exploitation

1. Définir des objectifs et des principes de sûreté

2. Identifier les risques

3. Définir les niveaux d'aléas à retenir

Volet Déterministe

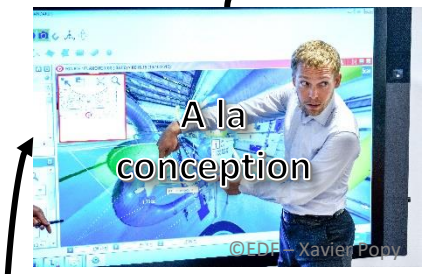
4. Définir les « cibles de sûreté » à protéger

Volet Probabiliste (EPS)

4. Analyse des impacts sur l'installation Quantification du Risque

5. Définir les moyens de protection & de suivi en exploitation

6. Suivi du REX & Réexamen de Sûreté



- Concevoir les moyens de protection pour les niveaux d'aléas retenus
- Prendre des marges de conception
- Optimiser la conception au regard des enseignements des analyses probabilistes

Prévention

Détection

- Surveiller les évènements climatiques
- Surveiller le REX d'exploitation
- Surveiller les évolutions des alentours des sites de production
- Surveiller les évolutions des connaissances sur le changement climatique

Mitigation

- Réexaminer régulièrement les niveaux d'aléas à prendre en compte
- Démontrer la robustesse des moyens de protection à ces niveaux
- Faire évoluer les dispositifs de protection si besoin

- Suivi des prévisions météorologiques
- Respect des STE (Spécifications Techniques d'Exploitation)
- Maintien des installations dans un état conforme
- Dispositifs mobiles de protections
- …

Prévention

Détection

- Mesures locales des paramètres environnementaux (niveaux d'eau, températures, vent, …)
- Mesures locales des paramètres de fonctionnement de l'installation

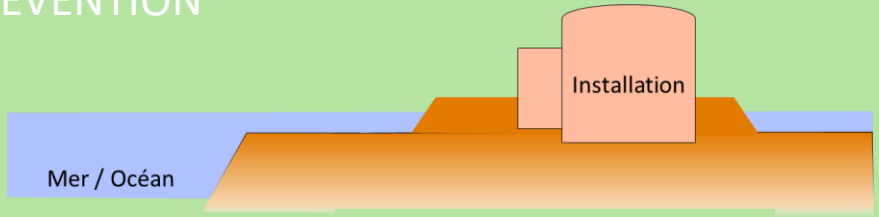
Mitigation

- Règles particulières de conduite
- Mise en configuration particulière de l'installation si nécessaire
- Protections spécifiques agressions
- Moyens ND
- FARN

2. DEMARCHE DE PROTECTION – Etape 5 : Définir les moyens de protection et de suivi en exploitation

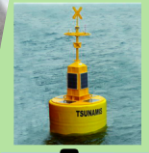
1. Définir des objectifs et des principes de sûreté
2. Identifier les risques
3. Définir les niveaux d'aléas à retenir
4. Définir les « cibles de sûreté » à protéger
5. Définir les moyens de protection & de suivi en exploitation
6. Suivi du REX & Réexamen de Sûreté

PREVENTION

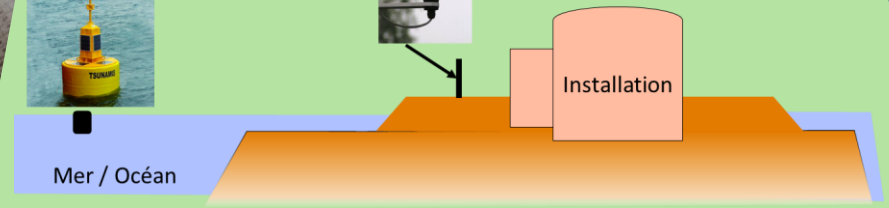


Utilisation du terrain naturel

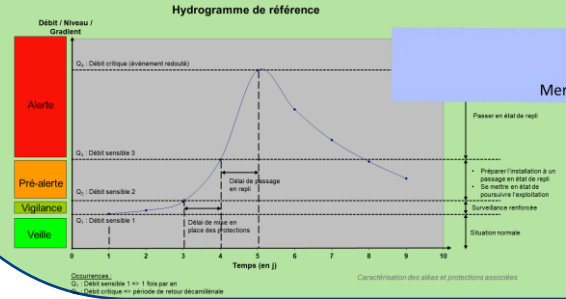
DETECTION

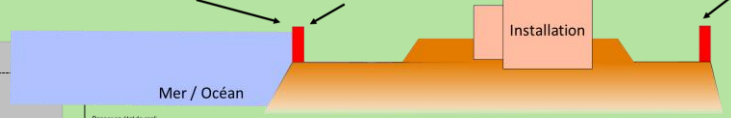


Mesures in situ

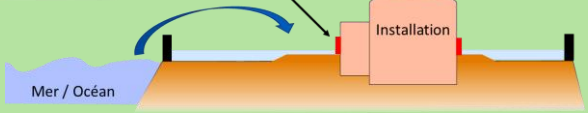


MITIGATION





Equipe de crise locale/nationale



CONTEXTE

RESILIENCE AUX EVENEMENTS EXTREMES

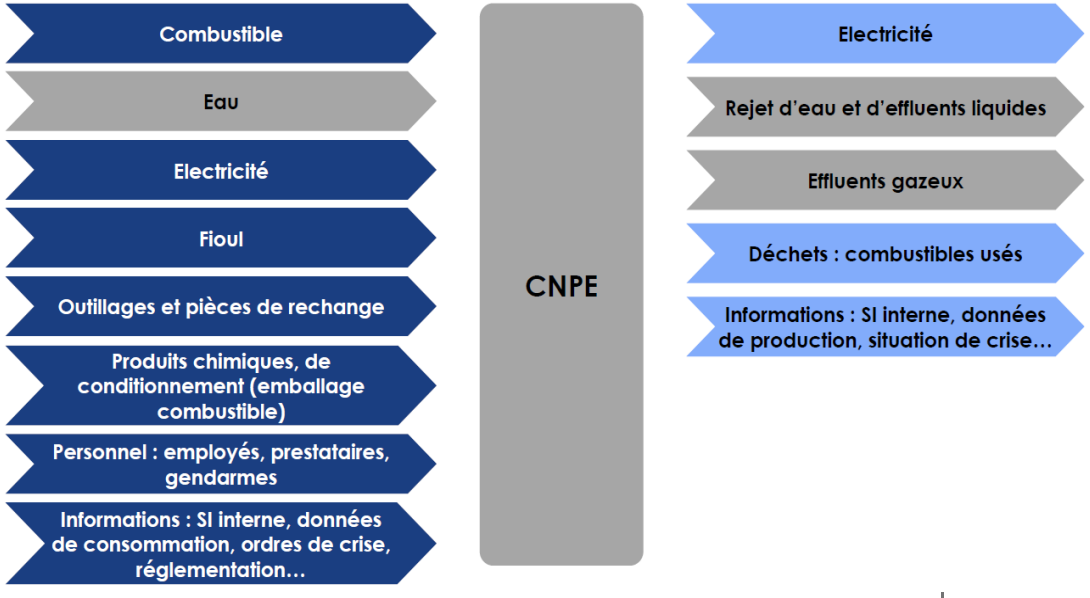
RESILIENCE AUX EVOLUTIONS « LENTES »

CONCLUSIONS

Impacts sur la production d'électricité

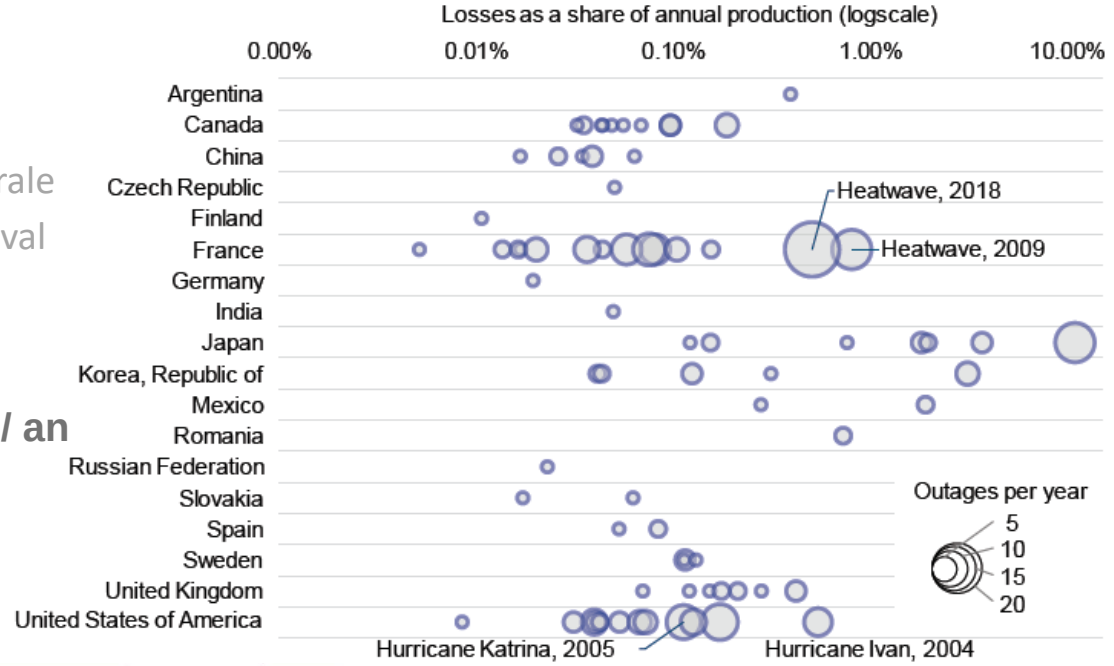
- **La production d'électricité peut être limitée**
  - Pour des raisons techniques
  - Pour des respecter la réglementation pour l'Environnement

- **Limites de production liées aux contraintes techniques**
  - L'analyse des flux entrants/sortants d'une centrale nucléaire permet d'identifier les initiateurs et scenarii potentiels de pertes de production d'électricité
  - Les impacts « long terme » du changement climatique risquent de perturber ces flux :
    - Rupture d'approvisionnements, …
    - Pénibilité du travail liés aux températures élevées, …

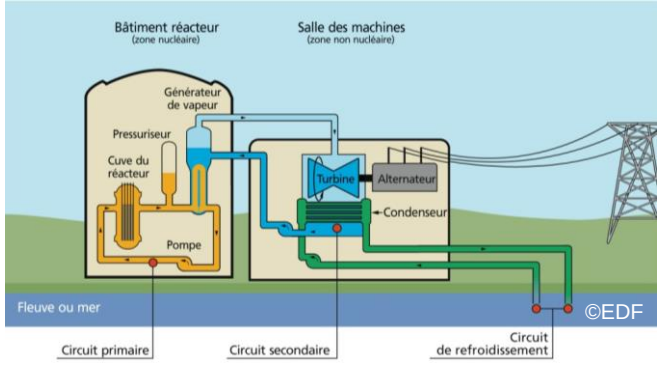


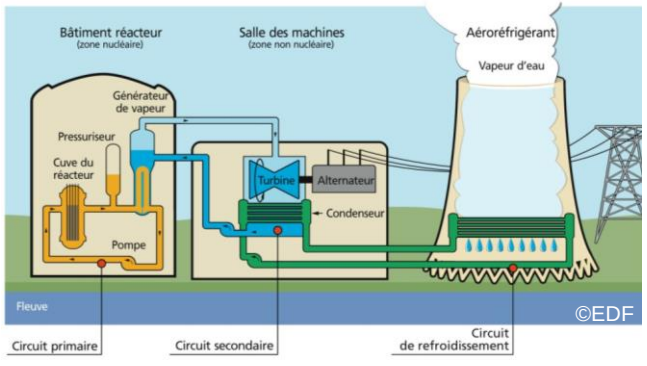
Impacts sur la production d'électricité

- **Limites de production liées à la réglementation pour l'Environnement**
  - Respect d'une température maximale d'eau en aval d'une centrale
  - Respect d'un seuil maximal d'échauffement entre l'amont et l'aval d'une centrale
  - Respect d'un seuil maximal de prélèvement d'eau
- **Sur la période 2000-2020 → baisses de production ~0,4% / an**
- **Les impacts du changement climatique sont susceptibles d'augmenter ces baisses de production…**



Source : IAEA–Climate change and nuclear power 2020





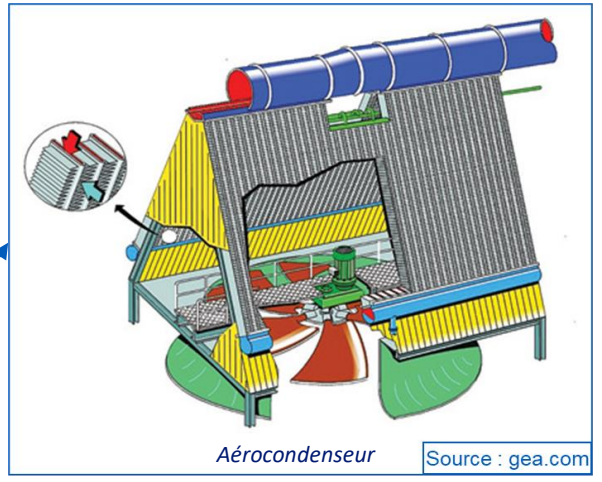
3. RESILIENCE AUX EVOLUTIONS « LENTES »

Des solutions existent…

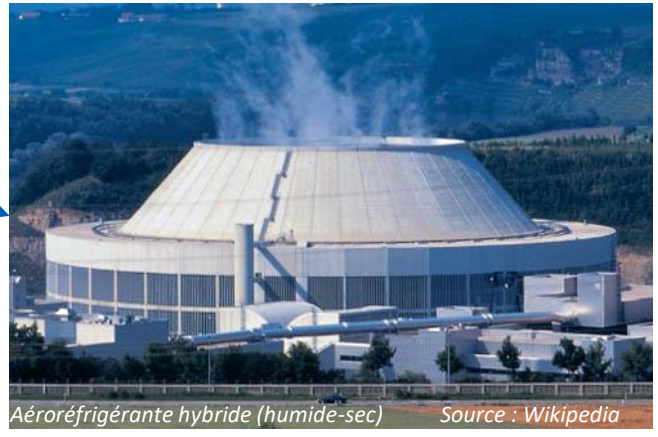
- Combustible
- Eau
- Electricité
- Fioul
- Outillages et pièces de rechange
- Produits chimiques, de conditionnement (emballage combustible)
- Personnel : employés, prestataires, gendarmes
- Informations : SI interne, données de consommation, ordres de crise, réglementation…

CNPE

- Electricité
- Rejet d'eau et d'effluents liquides
- Effluents gazeux
- Déchets : combustibles usés
- Informations : SI interne, données de production, situation de crise…



Aérocondenseur Source : gea.com

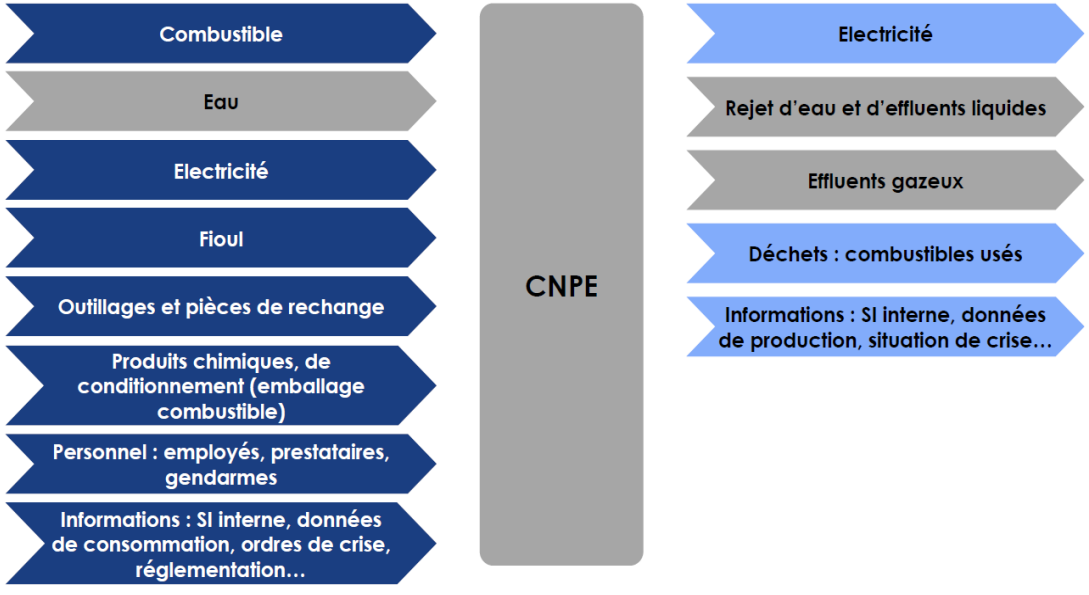


Aéroréfrigérante hybride (humide-sec) *Source : Wikipedia*

… D'autres sont à construire collectivement

- **Concernant les approvisionnements** → le caractère international de nos approvisionnements (ex. : combustible) nécessite une réflexion d'ensemble
- **Concernant les conditions de travail des personnels (EDF et prestataires)** → elles devront être adaptées pour tenir compte de l'augmentation de la pénibilité (ex. : tenues adaptées, horaires de travail décalés en cas de canicule, …)
- **Disponibilité des réseaux de transport et de distribution d'électricité, …**

→ ***Nécessité de réaliser des plans d'adaptation au changement climatique et d'en partager les éléments d'interfaces***



CONTEXTE

RESILIENCE AUX EVENEMENTS EXTREMES

RESILIENCE AUX EVOLUTIONS LENTES

CONCLUSIONS

Résilience face aux aléas naturels

- **Les aléas naturels sont pris en compte pour assurer la sûreté des installations nucléaires**
  - Pour la totalité des risques rencontrés en France
  - Pour des intensités d'aléas très élevées
  - En considérant les effets du changement climatique
- **Des dispositifs de protection**
  - Conçus pour résister à ces intensités d'aléas… avec des marges
  - Qui font l'objet d'une surveillance
- **Des dispositifs de re questionnement des niveaux d'aléas pris en compte et des marges de conception**
  - Suivi des évènements naturels :
  - Anticipation de l'avenir : prise en compte du changement climatique, …
  - Réexamen de sûreté
- **Les solutions technologiques permettant de s'adapter au changement climatiques existent déjà**
- **Des travaux en cours pour limiter les pertes de production à long terme.**