

# LES CENTRALES SONT-ELLES SÛRES ?



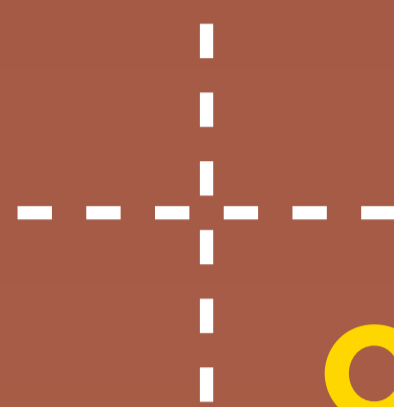


# LES CENTRALES SONT-ELLES SÛRES ?

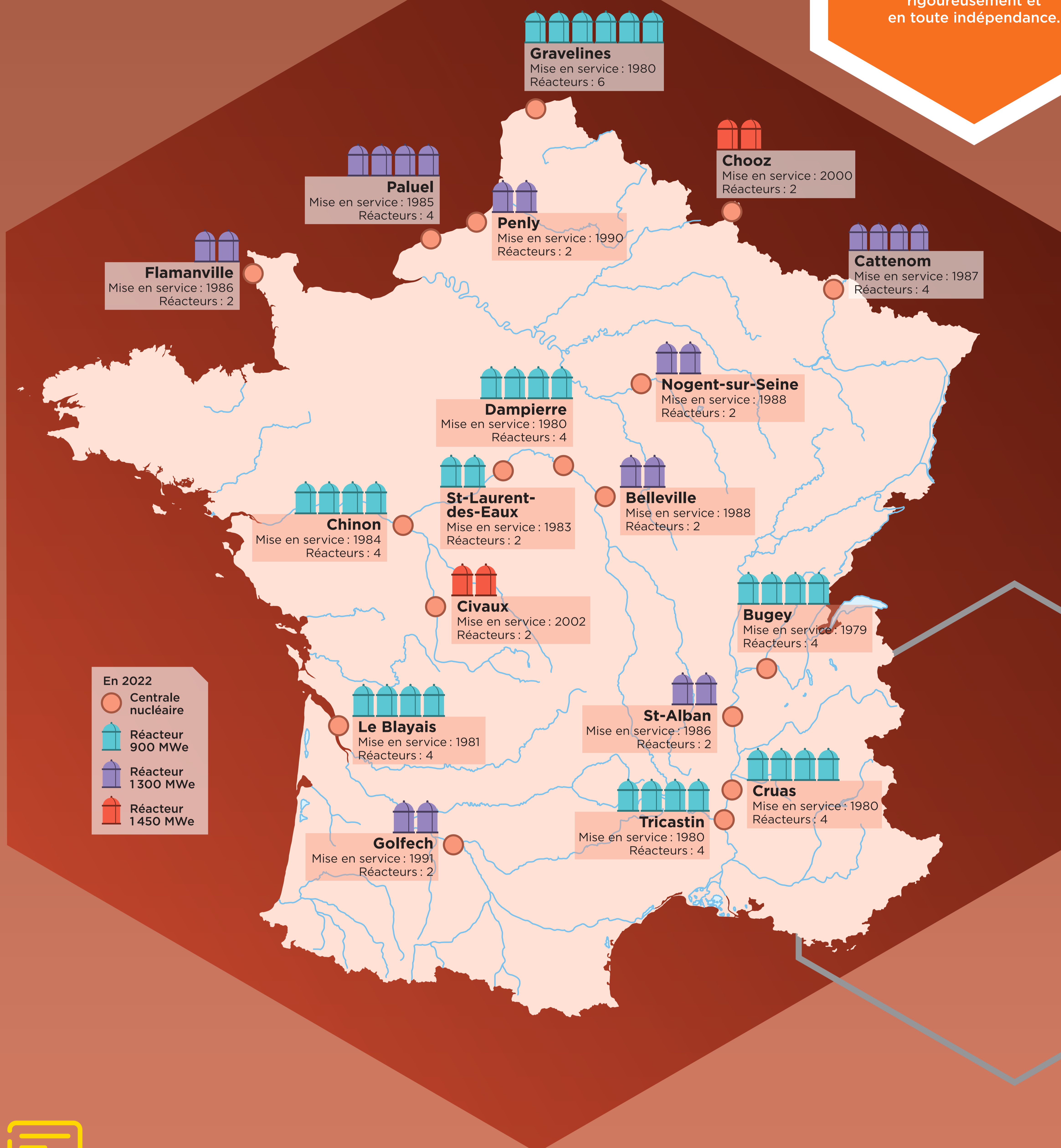
# LE NUCLÉAIRE EN FRANCE



Dans le monde, plus de 440 réacteurs nucléaires produisent environ 10 % de l'électricité. Cette part atteint 30 % en Europe et plus de 75 % en France, qui compte **56 réacteurs** nucléaires de la filière à eau sous pression mis en service entre la fin des années 1970 et le début des années 2000.



## CARTE DES CENTRALES EN EXPLOITATION EN FRANCE



### SÛRETÉ

Comme pour toute activité à risque, la sûreté de l'exploitation et du démantèlement des installations est réglementée, expertisée et contrôlée rigoureusement et en toute indépendance.



## EN DÉBAT POUR OU CONTRE LES CENTRALES NUCLÉAIRES ?



- Les personnes favorables au nucléaire** avancent les arguments suivants :
- cette énergie assure un prix compétitif à l'énergie électrique produite ;
  - c'est une source d'énergie qui n'émet quasiment pas de CO<sub>2</sub> ;
  - des exigences strictes encadrent la sûreté des installations nucléaires ;
  - les incidents sont déclarés et analysés pour en tirer les leçons.



- Les opposants** répondent avec les raisonnements suivants :
- l'exploitation nucléaire a déjà provoqué des accidents graves en dépit des contrôles ;
  - ces accidents ont contaminé l'environnement et induit des risques pour la santé ;
  - le coût du démantèlement des installations et du stockage des déchets nucléaires inquiète ;
  - certains déchets devront être stockés pendant des milliers d'années posant la question de la sûreté et de la transmission des connaissances et compétences aux générations futures.



**LES CENTRALES  
SONT-ELLES SÛRES ?**

# LA FISSION DE L'ATOME ET SES RISQUES



Le mot atome vient du grec *atomos*, qui signifie « ne peut être divisé ». Et pourtant ! **Les atomes peuvent bien être cassés.** Ce phénomène, appelé **fission nucléaire**, produit une intense chaleur qui peut être convertie en électricité dans une centrale nucléaire ! Mais ce procédé comporte des risques intrinsèques : l'emballement de la réaction en chaîne et la dispersion d'atomes radioactifs, les produits de fission, par exemple.

## LE CAS DE L'URANIUM 235

Lorsqu'un noyau d'uranium 235 est bombardé par un neutron, il casse. C'est la fission nucléaire d'un atome qui engendre toujours trois phénomènes :

### 1. DE LA CHALEUR EST PRODUITE

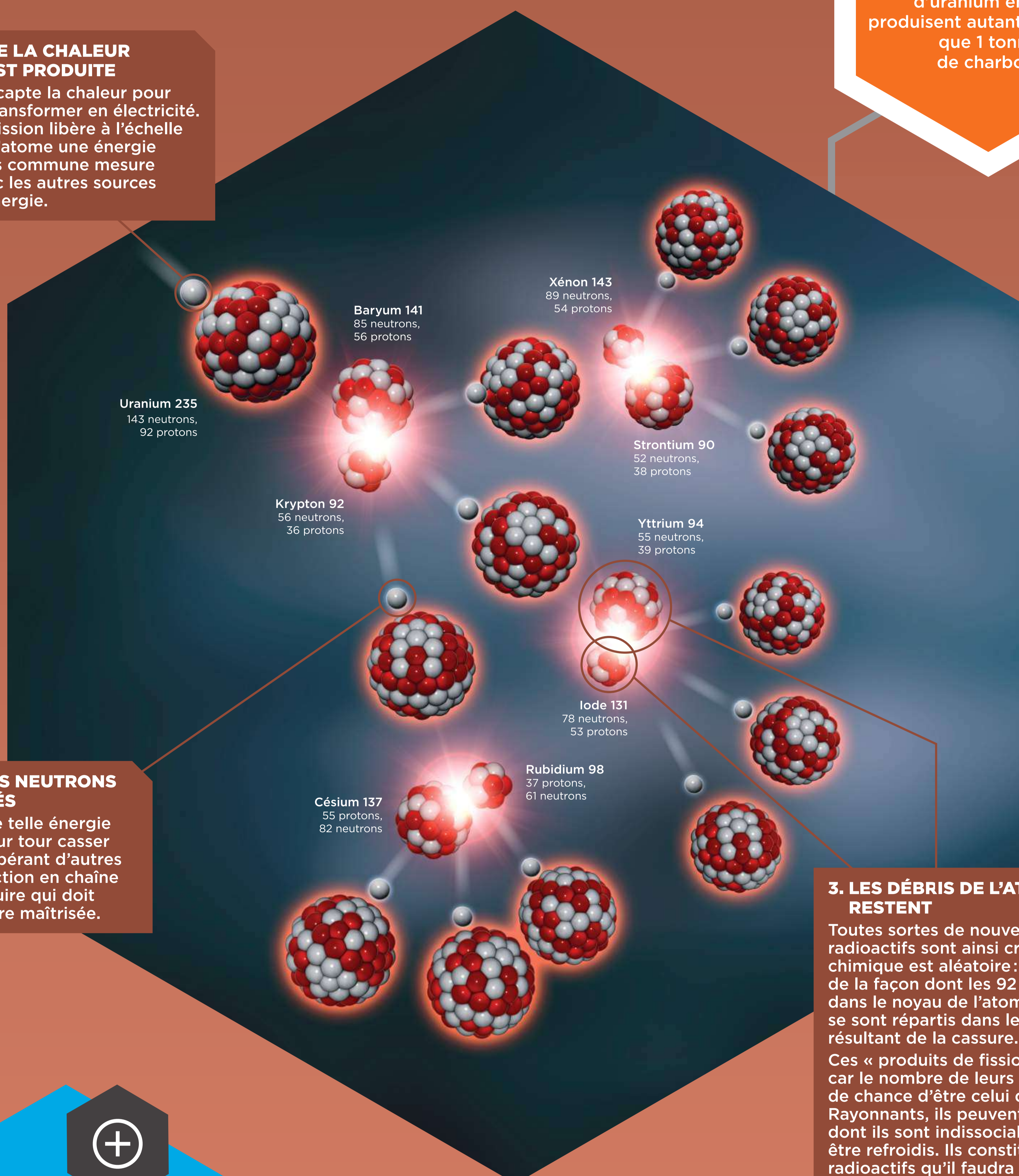
On capte la chaleur pour la transformer en électricité. La fission libère à l'échelle de l'atome une énergie sans commune mesure avec les autres sources d'énergie.

### 2. DEUX OU TROIS NEUTRONS SONT PROJETÉS

Ils le sont avec une telle énergie qu'ils peuvent à leur tour casser d'autres noyaux, libérant d'autres neutrons : une réaction en chaîne peut ainsi se produire qui doit impérativement être maîtrisée.

### ÉQUIVALENCE

10 grammes d'uranium enrichi produisent autant d'énergie que 1 tonne de charbon.



### 3. LES DÉBRIS DE L'ATOME ORIGINAL RESTENT

Toutes sortes de nouveaux corps radioactifs sont ainsi créés. Leur nature chimique est aléatoire : elle dépend de la façon dont les 92 protons contenus dans le noyau de l'atome d'uranium se sont répartis dans les deux morceaux résultant de la cassure.

Ces « produits de fission » sont radioactifs car le nombre de leurs neutrons a peu de chance d'être celui des corps naturels. Rayonnants, ils peuvent chauffer la matière dont ils sont indissociables et doivent être refroidis. Ils constituent des déchets radioactifs qu'il faudra stocker et éventuellement retraiter. Il faut absolument les confiner pour qu'ils ne s'échappent pas dans l'environnement.



### Dans le cas d'une bombe atomique,

l'emballement de la réaction en chaîne est recherché afin de produire le maximum de dégâts.

Dans une centrale au contraire, des barres de contrôle et de l'eau borée permettent d'absorber les neutrons afin de contrôler la réaction.

### UN PEU D'HISTOIRE

**1938**  
Découverte de la fission nucléaire par l'Allemand Otto Hahn et son assistant Fritz Strassmann avec la contribution d'une physicienne autrichienne, Lise Meitner.

**1948**  
Mise en service de la pile Zoé, premier réacteur expérimental français.

**1956**  
En France, à Marcoule, mise en service du premier réacteur français (G1) à produire expérimentalement de l'électricité. Réacteur uranium naturel graphite gaz (UNGG).

**1977**  
Mise en service du réacteur n° 1 de la centrale de Fessenheim en Alsace, premier réacteur à eau sous pression (REP) d'un vaste programme qui en comprendra 58.

7.3

Conception : Directions de la communication ASN et IRSN – Mai 2022  
Conception et réalisation graphiques : www.kazoar.fr – Pictos : Freepik, Kazoar – Illustration : La fabrique-créative/Bruno Bourgeois  
Reproduction interdite sans l'accord de l'ASN/IRSN. Pour toute information : contact@irsn.fr



## LES CENTRALES SONT-ELLES SÛRES ?

# LE FONCTIONNEMENT D'UNE CENTRALE NUCLÉAIRE



Sur le principe, un réacteur nucléaire peut être comparé à une gigantesque cocotte-minute. La vapeur d'eau créée par la chaleur de la fission nucléaire entraîne une turbine qui, grâce à l'alternateur, produit de l'électricité.

### LES HOMMES AUX COMMANDES

Des opérateurs pilotent le fonctionnement de la centrale grâce à des milliers de capteurs. Ils activent des vannes et des pompes.

### REFROIDIR MÊME À L'ARRÊT

Les résidus de la fission continuent à libérer beaucoup de chaleur même lorsque le réacteur est arrêté et qu'il n'y a plus de réaction en chaîne.

#### LE COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE

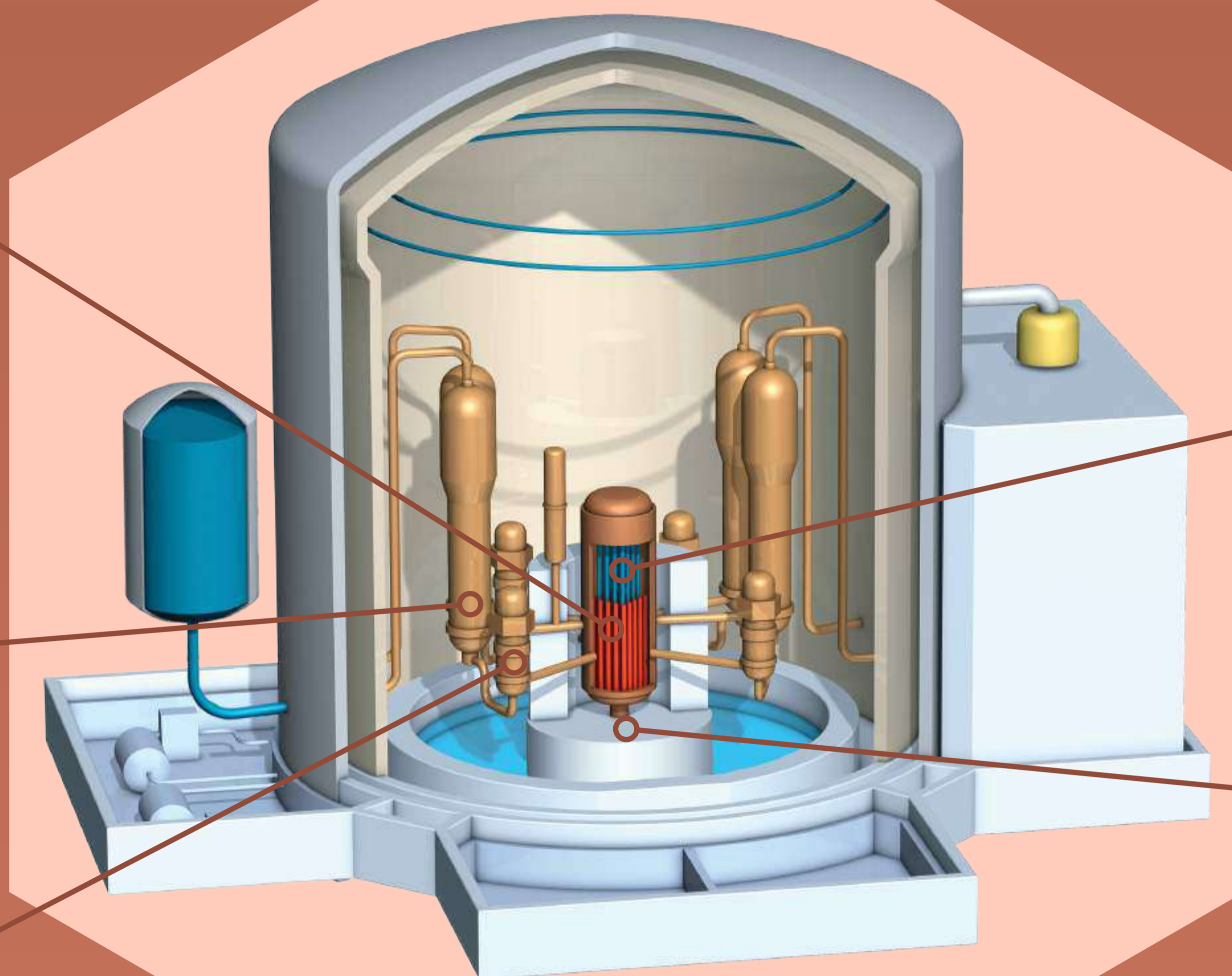
Le combustible est placé dans une cuve en acier remplie d'eau. Chaque seconde, des milliards d'atomes cassent en dégageant énormément d'énergie. Cette chaleur chauffe l'eau du circuit primaire qui est portée à plus de 300 °C.

#### GÉNÉRATEUR DE VAPEUR

L'eau brûlante du circuit primaire chauffe celle du circuit secondaire qui est transformée en vapeur.

#### POMPES PRIMAIRES

Elles font circuler l'eau qui refroidit le combustible.



#### LA RÉGULATION

La chaleur produite par le combustible est régulée par les barres de commande. Cela permet d'adapter la production d'électricité à la demande des consommateurs.

#### LA CUVE

Avec ses 20 cm d'épaisseur d'acier, elle emprisonne les 40 tonnes de combustible contenues dans des assemblages de tubes, remplis de pastilles d'oxyde d'uranium.

#### LA TURBINE ET L'ALTERNATEUR

La pression de la vapeur fait tourner la turbine qui entraînera l'alternateur produisant l'électricité qui est transportée dans des lignes à très haute tension.

#### TOUR AÉROREFRIGÉRANTE

Cette grande tour participe au refroidissement de l'eau. Elle n'est pas nécessaire aux centrales situées en bord de mer ou à proximité de fleuves à fort débit.

#### CIRCUIT PRIMAIRE

L'eau de ce circuit ne sort jamais du réacteur.

#### CIRCUIT SECONDAIRE DE REFROIDISSEMENT

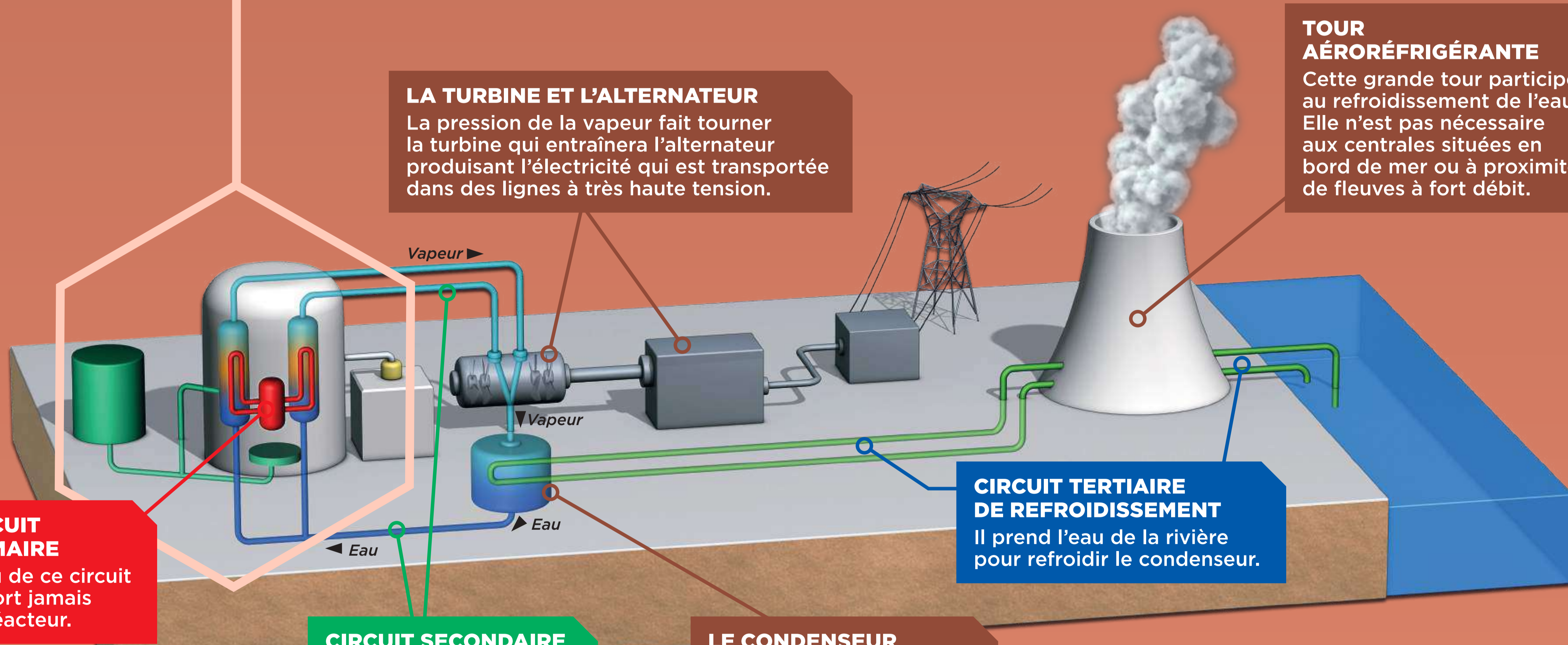
L'eau de ce circuit change d'état et passe successivement de l'état liquide à l'état gazeux.

#### LE CONDENSEUR

Après son passage dans la turbine, la vapeur est refroidie, retransformée en liquide et renvoyée vers le générateur de vapeur pour un nouveau cycle.

#### CIRCUIT TERTIAIRE DE REFROIDISSEMENT

Il prend l'eau de la rivière pour refroidir le condenseur.





## LES CENTRALES SONT-ELLES SÛRES ?

# LA SÛRETÉ D'UNE CENTRALE NUCLÉAIRE



De nombreux systèmes de sûreté obligatoires équipent une centrale afin de réduire les risques d'accident grave et d'en limiter les conséquences.

### FAIRE BAISSER LA PRESSION EN CAS D'ACCIDENT

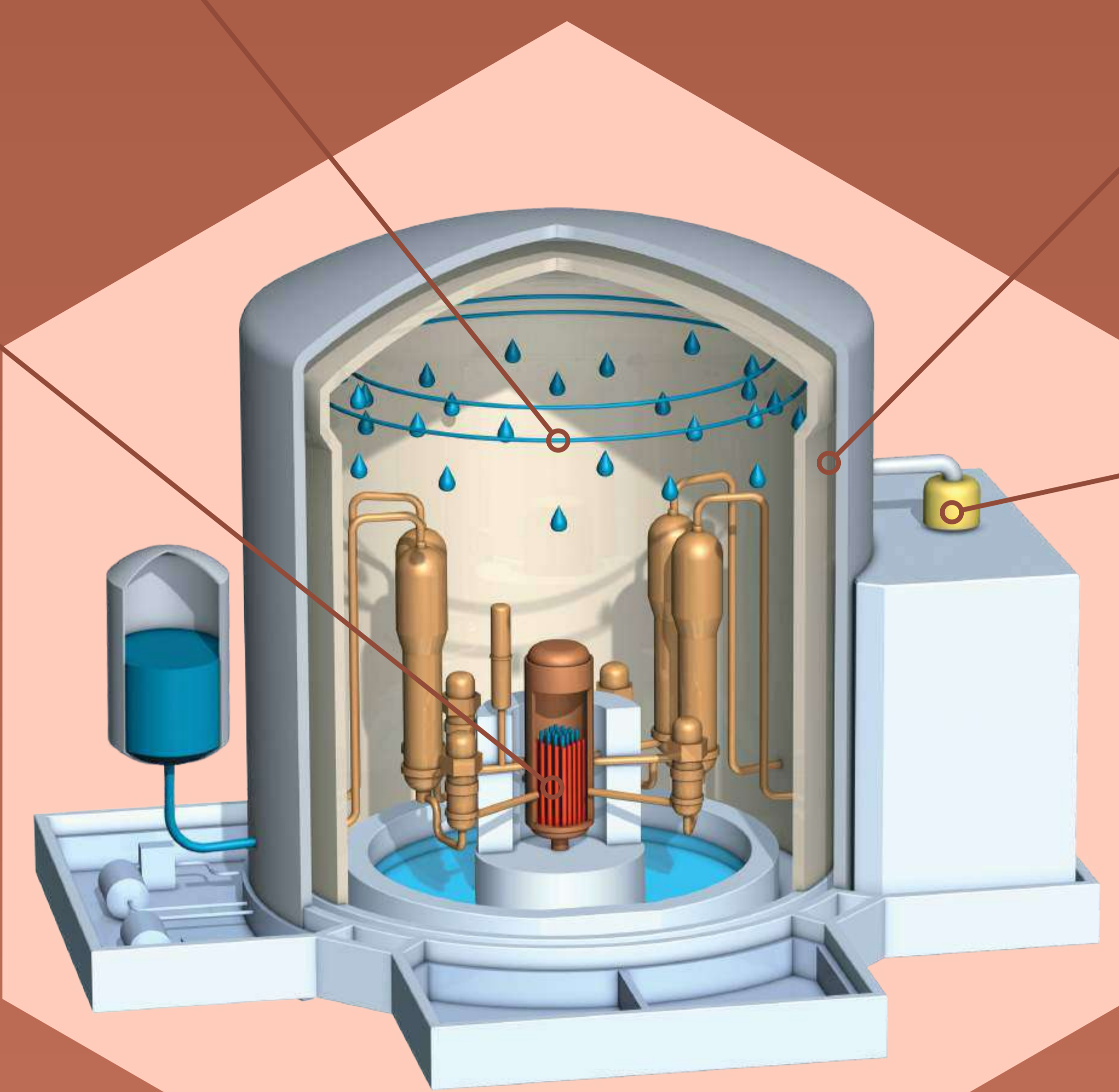
En fonctionnement, l'eau est à 155 bars. S'il y a une fuite, la pression monte dans le bâtiment du réacteur et pourrait conduire à la perte de l'étanchéité. Dans ce cas, un circuit d'eau froide se déclenche, faisant baisser la pression en aspergeant le réacteur de fines gouttelettes.

### CONFINER LES PRODUITS DE FISSION RADIOACTIFS

Les gaines de métal qui entourent le combustible et le circuit primaire (dont la cuve du réacteur) forment deux barrières. De plus, le bâtiment du réacteur lui-même sert de troisième barrière. Sur les réacteurs de 900 MW, cette barrière est constituée d'une enceinte en béton précontraint pourvue d'une peau en acier. Sur les réacteurs plus puissants, une double paroi de béton assure l'étanchéité.

### CONTRÔLER LA RÉACTION EN CHAÎNE

Des barres de contrôle et de l'eau borée permettent de contrôler la réaction en chaîne. Les barres arrêtent immédiatement le réacteur en cas de dysfonctionnement ou de séisme.

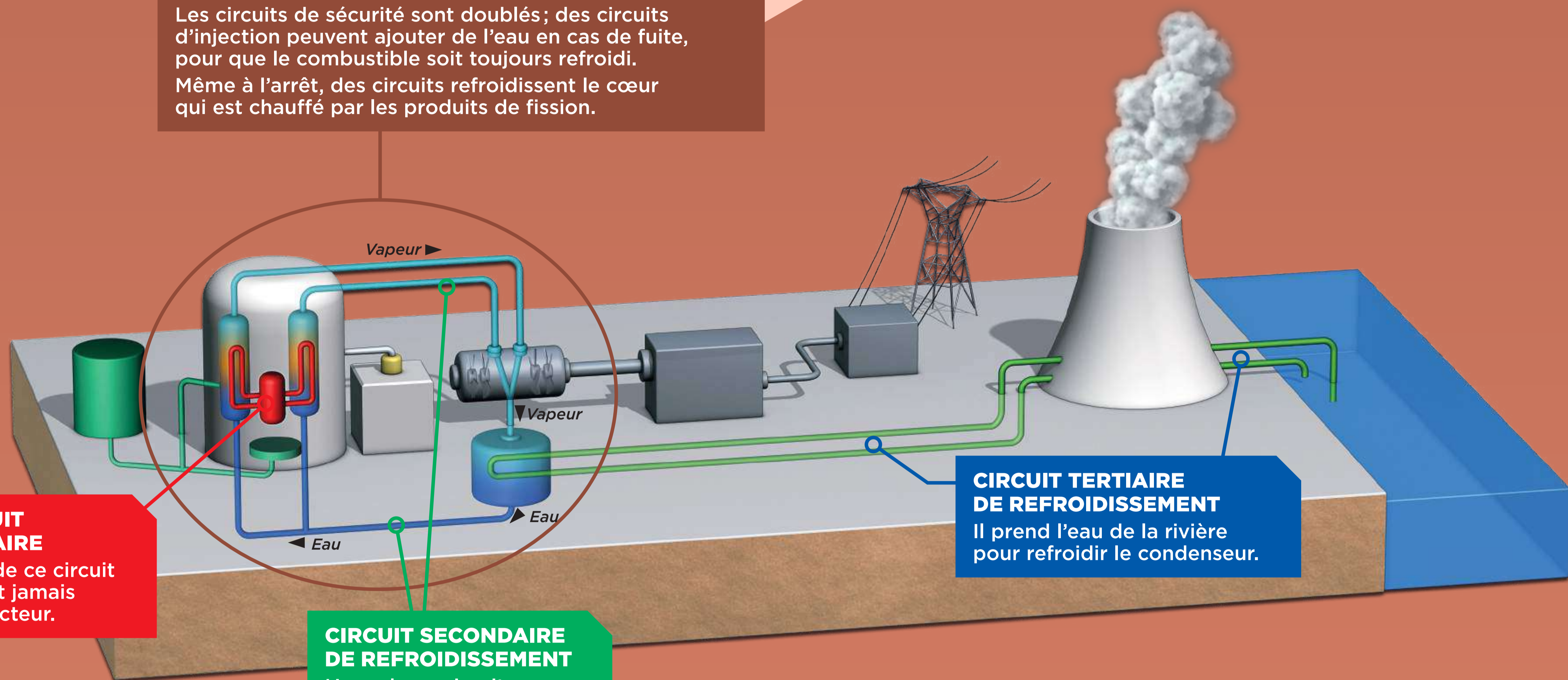


### DÉPRESSURISER EN CAS D'ACCIDENT

Si une trop forte pression menace l'étanchéité du bâtiment, on le dépressurise en ouvrant ce circuit. C'est l'ultime recours car il rejette les produits de fission dans l'environnement par une cheminée après les avoir filtrés.

### REFROIDIR POUR ÉVITER LA FUSION DU CŒUR

La centrale est équipée pour assurer un refroidissement continu du combustible en fonctionnement, à l'arrêt et pendant un accident. Les circuits de sécurité sont doublés; des circuits d'injection peuvent ajouter de l'eau en cas de fuite, pour que le combustible soit toujours refroidi. Même à l'arrêt, des circuits refroidissent le cœur qui est chauffé par les produits de fission.



### CIRCUIT PRIMAIRE

L'eau de ce circuit ne sort jamais du réacteur.

### CIRCUIT SECONDAIRE DE REFOUILLISSEMENT

L'eau de ce circuit change d'état et passe successivement de l'état liquide à l'état gazeux.

### CIRCUIT TERTIAIRE DE REFOUILLISSEMENT

Il prend l'eau de la rivière pour refroidir le condenseur.

### ALIMENTER L'ENSEMBLE DES SYSTÈMES DE SÛRETÉ

Des groupes électrogènes de secours permettent de faire fonctionner les pompes, les instruments de mesure et les vannes en cas de panne d'électricité.



### DEPUIS L'ACCIDENT DE FUKUSHIMA

En France, les experts de l'IRSN ont préconisé l'adjonction de nouveaux systèmes de sûreté: « le noyau dur ».

Sur la base de ces recommandations, l'ASN a imposé l'installation de nouveaux équipements dans les centrales: centres de gestion de crise « bunkerisés », groupes électrogènes de secours supplémentaires...

Par ailleurs, EDF s'est dotée d'une Force d'action rapide du nucléaire (FARN) devant intervenir dans un site en situation d'accident pour retrouver les moyens en eau, air et électricité en moins de 24 heures.



**LES CENTRALES  
SONT-ELLES SÛRES ?**

# DES CENTRALES ET DES HOMMES



Près de 30 000 personnes travaillent dans les centrales nucléaires en France. De plus, 300 000 emplois y sont liés, directement ou indirectement.

## L'HOMME AU CŒUR DE LA SÛRETÉ

Toutes sortes de métiers sont impliquées : robinetiers, ingénieurs, électriciens, opérateurs de conduite, etc. La prise en compte des facteurs organisationnels, sociaux et humains est donc cruciale.

Management, formation, documents et méthodes de travail sont au cœur des préoccupations.

Par exemple, chaque opérateur est formé pendant deux ans à la conduite des réacteurs et retourne chaque année en stage où il révise la conduite en cas d'accident.

Dans les centrales nucléaires, l'inspection du travail est assurée par l'ASN.



## LA PROTECTION DES TRAVAILLEURS DU NUCLÉAIRE

Les travailleurs du nucléaire sont plus exposés aux rayonnements que les autres citoyens. La limite légale de dose de radioactivité qu'ils peuvent recevoir chaque année est fixée à 20 millisieverts au lieu de 1 millisievert pour le grand public.

Ils portent des dosimètres pour les avertir des doses ambiantes et calculer la dose reçue. Ils passent des visites médicales régulièrement.

Les études épidémiologiques faites sur la santé du personnel du CEA, d'EDF et d'Orano montrent qu'ils ont une santé équivalente à celle du personnel des grandes entreprises françaises.



## LA SOUS-TRAITANCE

Les travaux réalisés sur les sites nucléaires sont assurés à 80 % par des prestataires. Par exemple, lors des travaux de maintenance sur une centrale, dénommés les « arrêts de tranche », au cours desquels les réacteurs sont temporairement arrêtés, environ un millier de personnes réalisent plus de 10 000 interventions, organisées et planifiées par EDF.

Les sous-traitants sont formés à la radioprotection. Les contrôles et les vérifications font partie des règles de qualité.

## LES RISQUES LIÉS À LA MALVEILLANCE

Les installations nucléaires et les transports de substances radioactives peuvent être la cible d'actes de malveillance. Les installations sont protégées par :

- la lutte antiterroriste, la sécurité des avions, les interdictions de survol des sites nucléaires ;
- le renforcement des infrastructures et bâtiments ;
- la mise en place de procédures et moyens d'intervention permettant de limiter les conséquences possibles d'une attaque.

Ces sujets sont examinés par le Haut fonctionnaire de défense et de sécurité du ministère de l'Énergie, avec l'appui de l'IRSN.



## EN DÉBAT LA SOUS-TRAITANCE ET L'EXPLOITATION

➤ Les sous-traitants disent qu'ils sont exposés à 80 % des doses reçues pendant la maintenance, alors qu'ils ne bénéficient pas du même suivi médical du fait de leurs nombreux déplacements, ni des mêmes avantages que le personnel des exploitants nucléaires pour lesquels ils travaillent.

Le nombre de niveaux de sous-traitance a inquiété les autorités : jusqu'à 7 niveaux de sous-traitance ont pu être rencontrés.

◀ Les exploitants estiment que pour les travaux sur les pompes, les vannes, les automatismes..., le savoir-faire des sous-traitants est indispensable.

Depuis, des règles ont été imposées. La sous-traitance a notamment été limitée à 3 niveaux. De plus, l'exploitant doit conserver la maîtrise des opérations qu'il sous-traite.



### BILAN ANNUEL

de l'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France.





**LES CENTRALES  
SONT-ELLES SÛRES ?**

# LES CONTRÔLES À CHAQUE ÉTAPE DE LA VIE D'UNE CENTRALE



De la conception jusqu'au démantèlement, la vie d'une centrale est régie par un ensemble de **procédures strictes**.

## ÉTAPE 1 : LA CONSTRUCTION

Dès la conception de l'installation, l'ASN et l'IRSN vérifient que tous les scénarios d'accidents possibles sont pris en compte (rupture de tuyau, panne de vannes ou de pompes, perte d'électricité...), y compris ceux liés à des agressions externes (tremblement de terre, inondation...).

Ils vérifient que les dispositifs et équipements de secours prévus dans la démonstration de sûreté sont capables d'éviter les conséquences des accidents.

Lorsque l'installation est construite, l'ASN et l'IRSN vérifient que ce qui est réalisé est conforme à ce qui a été prévu dans la démonstration de sûreté et que les tests avant mise en service sont concluants.



Construction du réacteur EPR de Flamanville.



## ÉTAPE 2 : L'EXPLOITATION

Lorsque l'installation est mise en service, l'ASN et l'IRSN vérifient que la conduite et l'entretien de l'exploitation sont conformes aux procédures. L'ASN et l'IRSN analysent l'activité de l'exploitant et les incidents déclarés.

Les installations font l'objet d'inspections régulières de la part de l'ASN. Tous les 10 ans, lors des réexamens périodiques, l'ASN et l'IRSN s'assurent par ailleurs que l'installation est en conformité avec les exigences de sûreté en imposant de nombreux contrôles comme la mise en pression du bâtiment du réacteur pour vérifier son étanchéité. À cette occasion, les exigences de sûreté sont revues à la hausse.



Contrôle de la centrale du Tricastin.

## ÉTAPE 3 : LE DÉMANTÈLEMENT

Une fois la période d'exploitation terminée, il s'ensuit un processus de déconstruction étroitement surveillé qui dure une trentaine d'années :

1. les combustibles sont retirés et les circuits d'eau vidangés ;
2. les installations sont partiellement démontées : les principaux composants du circuit primaire sont isolés et enfermés dans des structures en béton ;
3. environ 10 ans plus tard, le temps de réduire sa radioactivité, l'installation est complètement démontée. Les matériaux et équipements radioactifs sont évacués. Le site est remis dans son état initial ou utilisé pour une autre installation.

### DES CONTRÔLES RÉGULIERS

À tout moment, de nouveaux travaux peuvent être exigés par l'ASN pour améliorer le niveau de sûreté en prenant en compte le retour d'expérience national et international. Par exemple, de nouveaux dispositifs ont été installés pour limiter le risque d'explosion lié à l'hydrogène ou pour piéger les atomes de césium rejetés en cas d'accident.

En fonctionnement normal, les rejets des installations dans l'environnement sont strictement encadrés par l'ASN.

L'IRSN fait des mesures dans l'environnement proche de l'installation dans l'air, l'eau et les produits agricoles pour vérifier le niveau de radioactivité.

### CHACUN SON RÔLE

#### L'EXPLOITANT (Orano, CEA, EDF)

Il demeure le premier responsable de la sûreté de son installation.

#### L'ASN (Autorité de sûreté nucléaire)

Elle est chargée de contrôler, d'autoriser et de réglementer la sûreté des installations.

#### L'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire)

Il est responsable de l'évaluation scientifique et technique de la sûreté mise en œuvre par les exploitants. Il apporte notamment son appui technique à l'ASN.



**LES CENTRALES  
SONT-ELLES SÛRES ?**

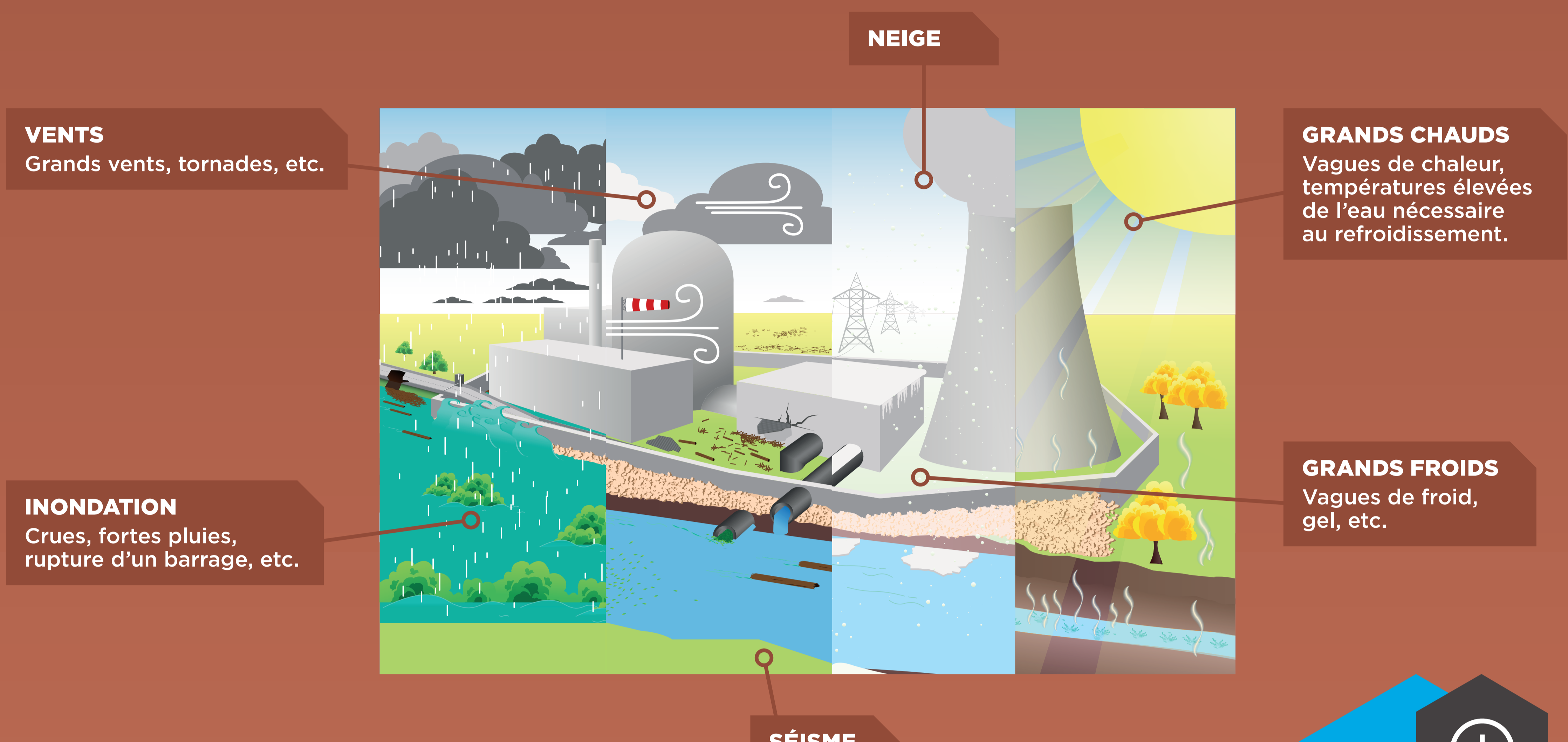
# LA PROTECTION CONTRE LES RISQUES NATURELS



Une centrale nucléaire possède des systèmes de sûreté permettant de faire face aux risques naturels.

## LES RISQUES NATURELS

Les centrales nucléaires doivent résister à des agressions naturelles variées. Pour chacune d'elles, il faut évaluer les niveaux d'agression exceptionnels et vérifier que l'installation pourra y faire face sans provoquer d'accident nucléaire ou de rejet de radionucléides dans l'environnement.



## DES PROTECTIONS ADAPTÉES

Les phénomènes naturels peuvent dégrader les matériels importants pour la sûreté des centrales ou les bâtiments qui protègent ces matériels. Par exemple, une inondation peut entraîner une entrée d'eau dans les locaux de la centrale susceptible de provoquer la défaillance des matériels situés dans ces locaux. Elle peut aussi rendre difficile l'accès au site et dégrader les alimentations électriques externes de la centrale. Ou encore, lors de vents extrêmes, des projectiles peuvent endommager les structures et bâtiments ou les matériels situés à l'extérieur.

La protection des centrales face à ces risques est assurée par des dispositions matérielles (digues, structures renforcées, grilles ou filets anti-projectiles...) ou organisationnelles (systèmes d'alerte météorologiques, rondes de surveillance...).

Les mesures de protection des centrales vis-à-vis des agressions naturelles sont notamment réévaluées tous les 10 ans lors des réexamens périodiques.

## D'AUTRES RISQUES NATURELS

D'autres risques naturels (neige, grêle, foudre...) sont également pris en compte, en vérifiant la tenue des structures et bâtiments et la disponibilité des matériels nécessaires à la sûreté de l'installation et, si besoin, en mettant en place des dispositions de protection dédiées.

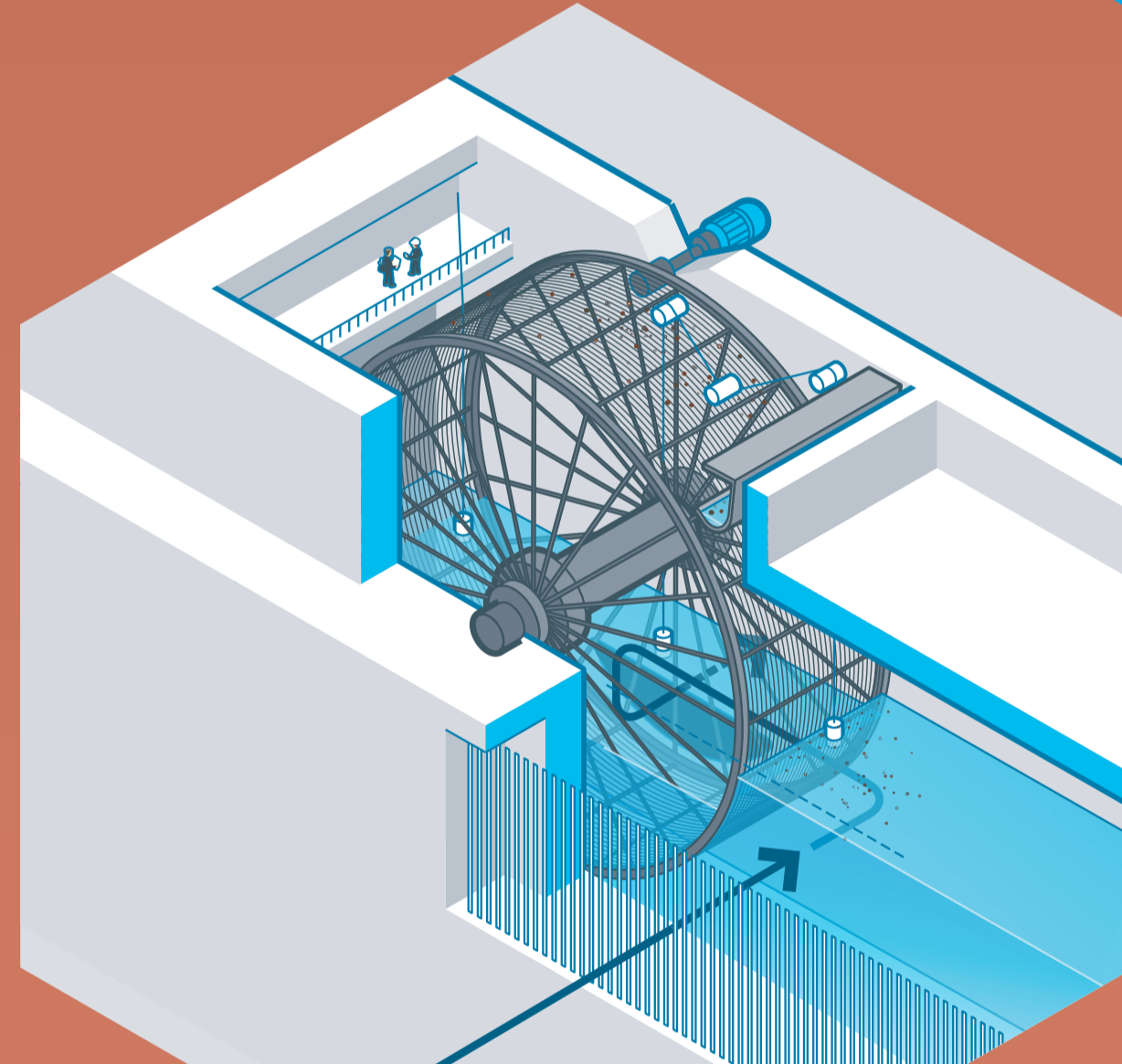
La station de pompage, qui prélève l'eau nécessaire au refroidissement de la centrale, est également protégée contre des phénomènes risquant d'obstruer le transit ou de dégrader la qualité de l'eau tels que la prise en glace, l'ensablement/envasement ou encore le colmatage par des végétaux, poissons, méduses...

## COMMENT LE RETOUR D'EXPÉRIENCE EST-IL PRIS EN COMPTE ?

Les événements nationaux et internationaux sont pris en compte systématiquement. L'accident de Fukushima au Japon a par exemple conduit à définir des niveaux de séisme et d'inondation complémentaires, majorés par rapport aux référentiels existants en 2011.

En France, plus récemment, le séisme du Teil survenu en Ardèche en 2019 a entraîné l'arrêt des réacteurs de la centrale de Cruas par mesure de précaution. Après contrôles, l'ASN a autorisé leur redémarrage. L'analyse des données et des travaux de recherche sur cet événement permettront de tirer des enseignements scientifiques pour améliorer la sûreté des centrales dans les années à venir.

Plus d'infos



Des tambours filtrants sont installés en amont des circuits de refroidissement des centrales, ils permettent de filtrer les éléments qui pourraient colmater les prises d'eau.



Plots en béton équipés de patins parasismiques. Les patins sont constitués de caoutchouc et de métal. Ils peuvent absorber les accélérations et les cisaillements associés aux mouvements du sol lors d'un séisme.

## LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Les effets des changements climatiques s'observent déjà et vont se poursuivre dans les années à venir, pouvant modifier la fréquence et l'intensité des phénomènes naturels.

Lorsque les connaissances scientifiques le permettent, les effets des changements climatiques sur les phénomènes météorologiques et hydrologiques sont pris en compte. C'est notamment le cas pour l'augmentation des niveaux marins ou des vagues de chaleur.

Les changements climatiques peuvent également avoir un effet sur le débit des cours d'eau qui alimentent les centrales en eau. Le risque d'un débit faible (étiage) est évalué à la conception afin de s'assurer que, même en cas de canicules prolongées, il restera assez d'eau pour refroidir les réacteurs. Au-delà du risque pour la sûreté qui est évalué par l'IRSN, ce sujet touche aussi d'autres questions, comme la protection de la flore et de la faune du cours d'eau qui peut conduire à arrêter des réacteurs lorsqu'ils augmentent trop la température de l'eau, mais également le partage des usages de l'eau.

## EN SAVOIR PLUS SUR

• **LE SÉISME**  
La prise en compte du risque sismique pour les sites des installations nucléaires (irsn.fr)



• **L'INONDATION ET LES ALÉAS CLIMATIQUES**  
Risques liés aux aléas climatiques (irsn.fr)







# LES CENTRALES SONT-ELLES SÛRES ?

# LE VIEILLISSEMENT DES INSTALLATIONS

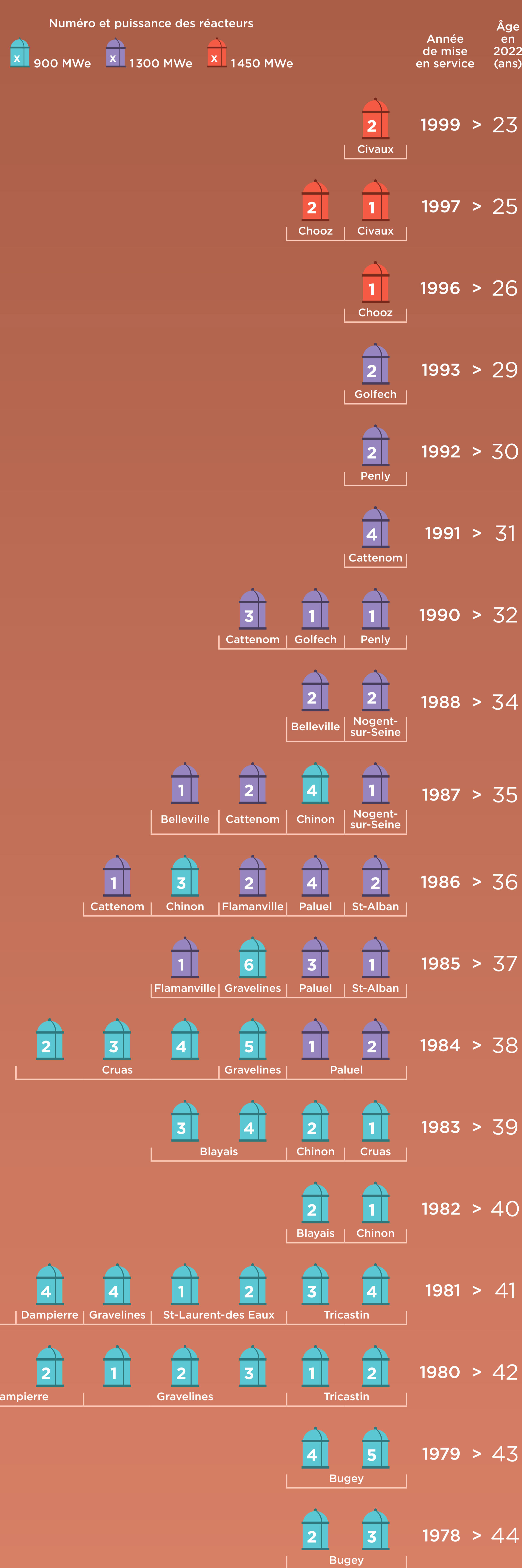


Comme toute autre installation industrielle, les centrales nucléaires sont sujettes au vieillissement. Il est nécessaire d'en maîtriser les risques.



## EN DÉBAT

## L'ÉTAT GÉNÉRAL DES CENTRALES FRANÇAISES



➤ Après chaque réexamen périodique, l'ASN fixe les conditions nécessaires à la poursuite de l'exploitation pour 10 ans supplémentaires. Une centrale peut être arrêtée pour des raisons de sûreté, par exemple si l'exploitant détecte un problème grave ou considère que les travaux demandés sont trop coûteux.

⚡ Une majorité de réacteurs français ont été construits entre 1977 et 1984. L'apparition de défauts génériques graves sur des matériels pourrait causer l'arrêt en chaîne de nombreuses centrales dans un temps relativement court.

## QUELLE EST LA DURÉE DE VIE D'UNE CENTRALE ?

➤ Dans certains pays, les autorisations d'exploitation des centrales nucléaires sont données pour une durée limitée. Aux États-Unis, par exemple, cette durée était de 40 ans puis elle a été portée à 60 ans pour la majorité des réacteurs et à 80 ans pour quelques autres réacteurs.

⚡ Dans d'autres pays comme la France, l'autorisation d'exploiter une installation nucléaire ne précise aucune limite dans le temps. Mais en contrepartie, les centrales sont soumises tous les 10 ans à un réexamen périodique approfondi. Son but est de vérifier la sûreté et d'apporter des améliorations techniques.

Toutefois, l'ASN considère que la poursuite du fonctionnement des réacteurs d'EDF au-delà de 40 ans n'est envisageable que si elle est associée à un programme ambitieux d'amélioration. Elle insiste pour que les objectifs de sûreté tendent vers ceux des nouveaux réacteurs, tel l'EPR.

## MAÎTRISE-T-ON L'USURE DES MATÉRIAUX ?

➤ Dans un réacteur nucléaire, la cuve, l'enceinte de confinement et certains câbles électriques sont des composants irremplaçables malgré leur dégradation dans le temps.

⚡ L'IRSN étudie les principaux mécanismes de dégradation : altération du béton de l'enceinte de confinement, évolution des défauts des aciers de la cuve, oxydation des gaines des câbles. Ces mécanismes sont pris en compte dès la conception et la fabrication puis dans un programme de maintenance préventive. Le but est de garder une image précise de l'état des matériaux et de rester maître du risque lié au vieillissement.

## LES MATÉRIELS PEUVENT-ILS SE PÉRIMER ?

➤ Les matériels importants pour la sûreté font l'objet d'une qualification : leur tenue et leur fonctionnement sont vérifiés dans les conditions d'un accident. Ils sont soumis à une maintenance périodique qui veille au remplacement des pièces et au maintien de leur fiabilité.

L'arrêt de la fabrication de certains composants ou la disparition de leur constructeur peuvent conduire à des difficultés, c'est pourquoi l'exploitant doit être en mesure de remplacer la pièce.

⚡ Toutefois, le remplacement par un nouveau modèle ou un nouveau fournisseur doit faire l'objet d'une qualification préalable.

# LE DÉMANTÈLEMENT



Même arrêtée **définitivement**, une centrale nucléaire continue de présenter des **risques**. Il faut la démanteler selon un scénario bien précis.

## LES ENJEUX SPÉCIFIQUES DU DÉMANTÈLEMENT D'UNE CENTRALE

Lors du démantèlement d'une centrale nucléaire, l'ASN veille en particulier à :

### LA PROTECTION DES TRAVAILLEURS

Les scénarios sont élaborés pour protéger les travailleurs. Si le risque d'exposition est trop fort, le travail se fait à distance grâce à des robots.

### LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS

Les déchets sont produits en quantité plus importante que lors de la phase d'exploitation et sont de nature différente car les équipements et structures sont activés ou contaminés. Le moment venu, les filières doivent être disponibles pour les évacuer.

### LA DISPONIBILITÉ DES MOYENS FINANCIERS

Il faut assurer la disponibilité du budget nécessaire au démantèlement.



### Pourquoi ne pas attendre que la radioactivité disparaisse ?

L'ASN recommande que l'exploitant nucléaire procède au démantèlement de son installation le plus rapidement possible après sa mise à l'arrêt.

Une période d'attente contribue certes à une diminution de la radioactivité par décroissance, mais comporte des inconvénients : vieillissement des structures, perte éventuelle de confinement, perte des connaissances techniques, charge du démantèlement sur les générations futures.

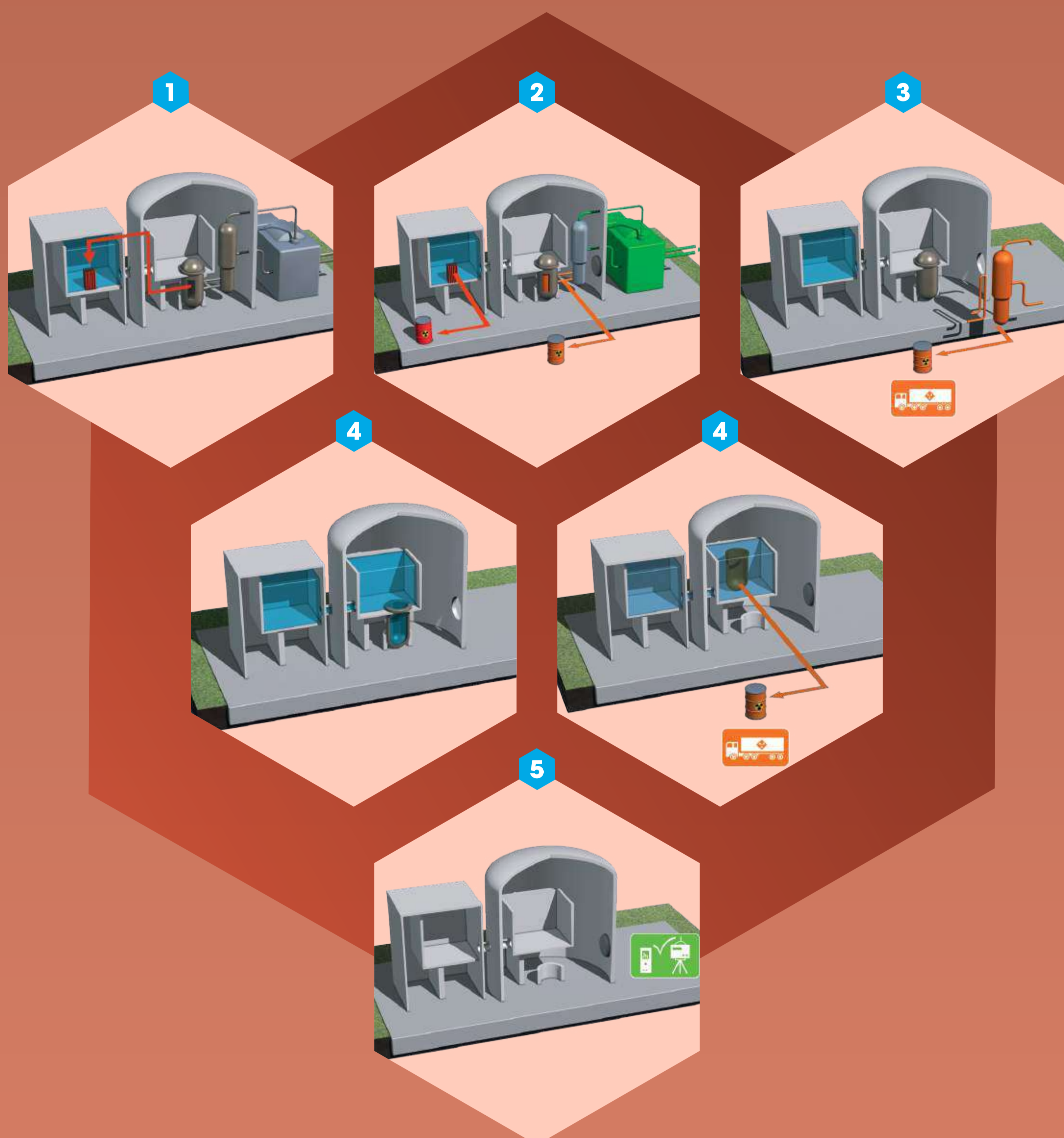


### La durée et le coût d'un démantèlement

La durée minimale totale du démantèlement d'une centrale est estimée à une vingtaine d'années.

En raison du manque de retour d'expérience, les coûts sont encore mal estimés. De plus, les méthodes de calcul peuvent être très différentes.

## SCÉNARIO ET TEMPORALITÉS D'UN DÉMANTÈLEMENT SOUS EAU D'UN RÉACTEUR (stratégie choisie pour le réacteur A de Chooz)



### 1. MISE À L'ARRÊT DÉFINITIF

Le combustible est déchargé du cœur du réacteur. Il va refroidir pendant quelques années dans la piscine d'entreposage.

### 2. ENVIRON 2 ANS APRÈS

Le combustible est envoyé à l'usine de La Hague pour traitement. L'eau du circuit primaire est vidangée. Le circuit de vapeur d'eau et la turbine sont démontés.

### 3. ENVIRON 5 ANS APRÈS

Les opérations de démontage commencent dans le bâtiment du réacteur, hormis pour la cuve du réacteur.

### 4. ENVIRON 10 ANS APRÈS

La cuve du réacteur est noyée afin de limiter les radiations pendant les opérations de démantèlement sur la cuve du réacteur. Puis la cuve et les structures internes du réacteur sont démantelées.

### 5. DE 20 À 30 APRÈS

Le site est assaini : soit les bâtiments sont conservés pour un éventuel usage ultérieur identifié, soit ils sont détruits.

## LES DÉMANTÈLEMENTS EN COURS

Les opérations de démantèlement diffèrent selon le type de réacteur.



Carte des démantèlements en cours.



## LE COÛT DU DÉMANTÈLEMENT

Un récent rapport de la Cour des comptes montre que le coût effectif du démantèlement dépasse les prévisions initiales.

Certaines associations s'inquiètent du coût final du démantèlement et de son financement.

Malgré l'expérience acquise au cours du démantèlement du réacteur à eau pressurisée (REP) de Chooz A, la France n'a pas encore l'expérience d'un démantèlement complet sur les réacteurs à eau pressurisée (REP).

Cependant, EDF intègre dans le prix du kilowatt-heure le coût estimé du démantèlement.



# LES CENTRALES SONT-ELLES SÛRES ?

# LES CENTRALES DE DEMAIN



Afin d'atteindre des objectifs plus ambitieux en matière de sûreté, de sécurité et d'économie de ressources, l'offre de centrales nucléaires est appelée à se diversifier au niveau mondial. Si certaines technologies sont déjà disponibles, d'autres sont encore à l'étude et pourraient voir le jour dans les années à venir.

## DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES À DIFFÉRENTES ÉCHELLES DE TEMPS...

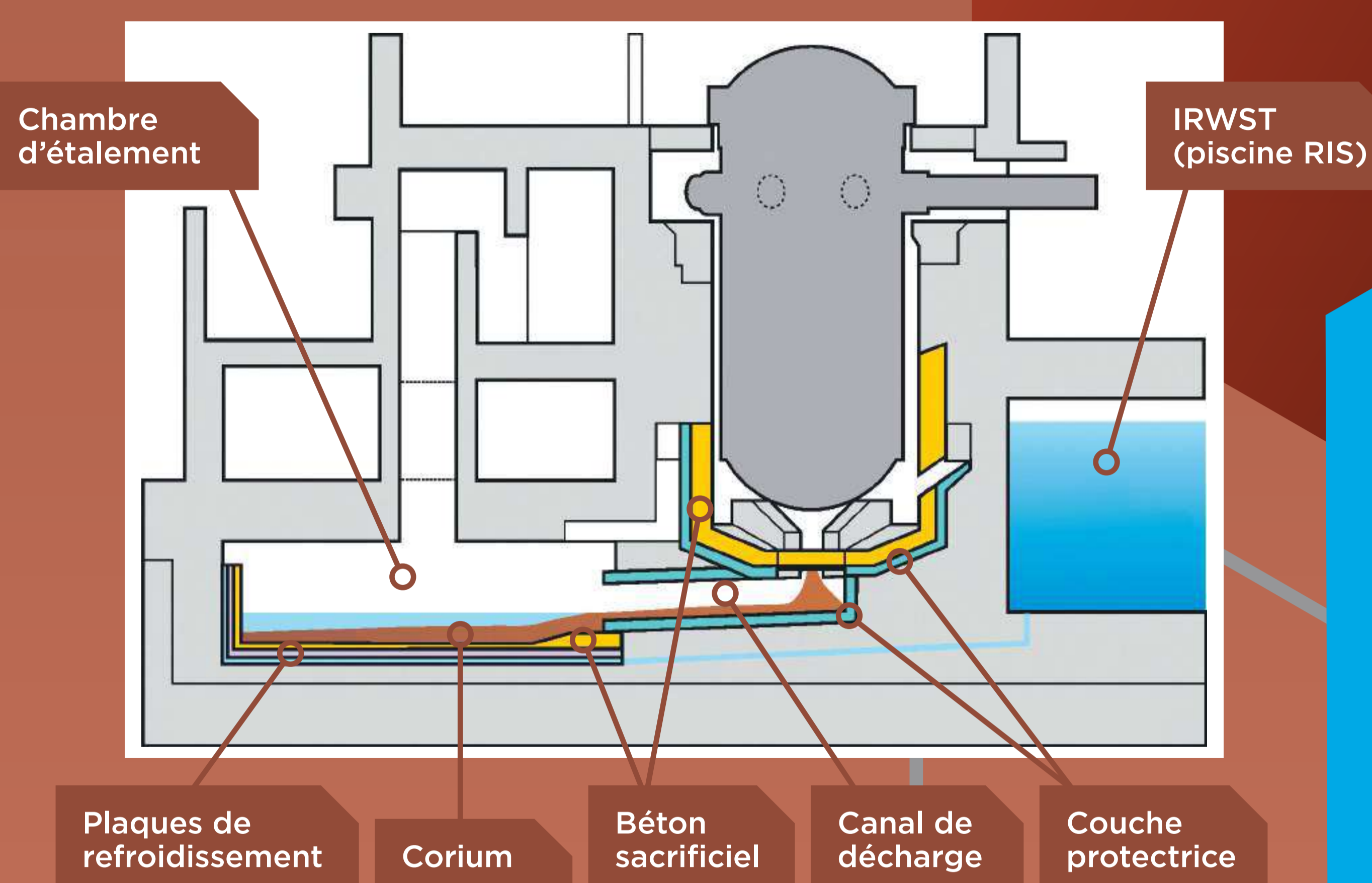
Dans le monde, plusieurs générations (technologies et versions) de réacteurs nucléaires se sont succédé au fil du temps. Par exemple, en France, la première génération de réacteurs nucléaires de la filière UNGG (uranium naturel modéré au graphite et refroidi au gaz) a été conçue dans les années 1950 et 1960. Ils sont aujourd'hui tous en cours de démantèlement.

La seconde génération correspond au parc nucléaire de réacteurs à eau sous pression actuellement en exploitation en France.

Le réacteur EPR en construction à Flamanville est dit « de troisième génération ».

Des prototypes sont déjà en cours de construction qui préfigurent les centrales de demain. D'autres technologies sont encore en phase de recherche : on parle parfois de quatrième génération.

Vue latérale du récupérateur de corium d'un réacteur EPR



## LES RÉACTEURS DE 4<sup>E</sup> GÉNÉRATION

Réacteurs à neutrons rapides, réacteur à haute température (HTR-PM), voire à très haute température (VHTR), réacteur rapide à sels fondus... Les concepts de réacteurs de 4<sup>e</sup> génération sont nombreux !



## L'EPR

L'EPR (*European Pressurized Reactor*) est un réacteur « évolutionnaire » puissant (1600 MWe) qui ne présente pas de grande rupture technologique par rapport aux installations en exploitation. Néanmoins, ce réacteur de 3<sup>e</sup> génération offre des améliorations significatives des systèmes de sûreté, notamment quatre voies pour les circuits d'eau importants pour la sûreté (contre deux dans les réacteurs en exploitation) capables de fonctionner de manière indépendante et réparties dans quatre bâtiments différents.

C'est le premier réacteur français à bénéficier dès sa conception des enseignements tirés des accidents nucléaires de Three Mile Island (États-Unis), de Tchernobyl (Ukraine) et Fukushima (Japon), ainsi que du retour d'expérience des réacteurs en fonctionnement.

Il est doté d'un récupérateur de corium permettant de refroidir le cœur fondu en cas d'accident grave et sa conception a pris en compte une exigence accrue en matière de radioprotection de l'Homme.

Enfin, les bâtiments qui abritent le réacteur, la salle de commande et le stockage du combustible sont recouverts d'une enveloppe de béton suffisante pour résister aux chutes d'avion.

## ... ET DE TAILLE

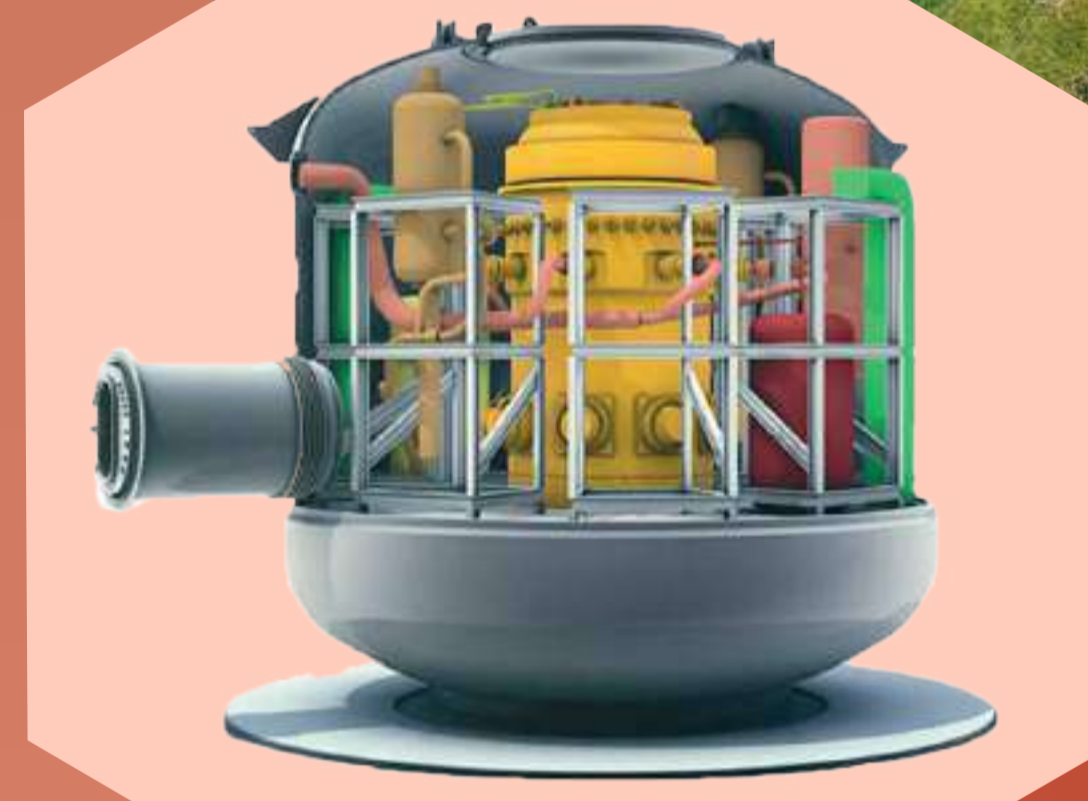
Les réacteurs nucléaires producteurs d'électricité sont de tailles et de puissances électriques variées, depuis l'EPR (1650 MWe) jusqu'au SMR (de 10 à 300 MWe)... voire au microréacteur (10 MWe) !

## LES PETITS RÉACTEURS MODULAIRES

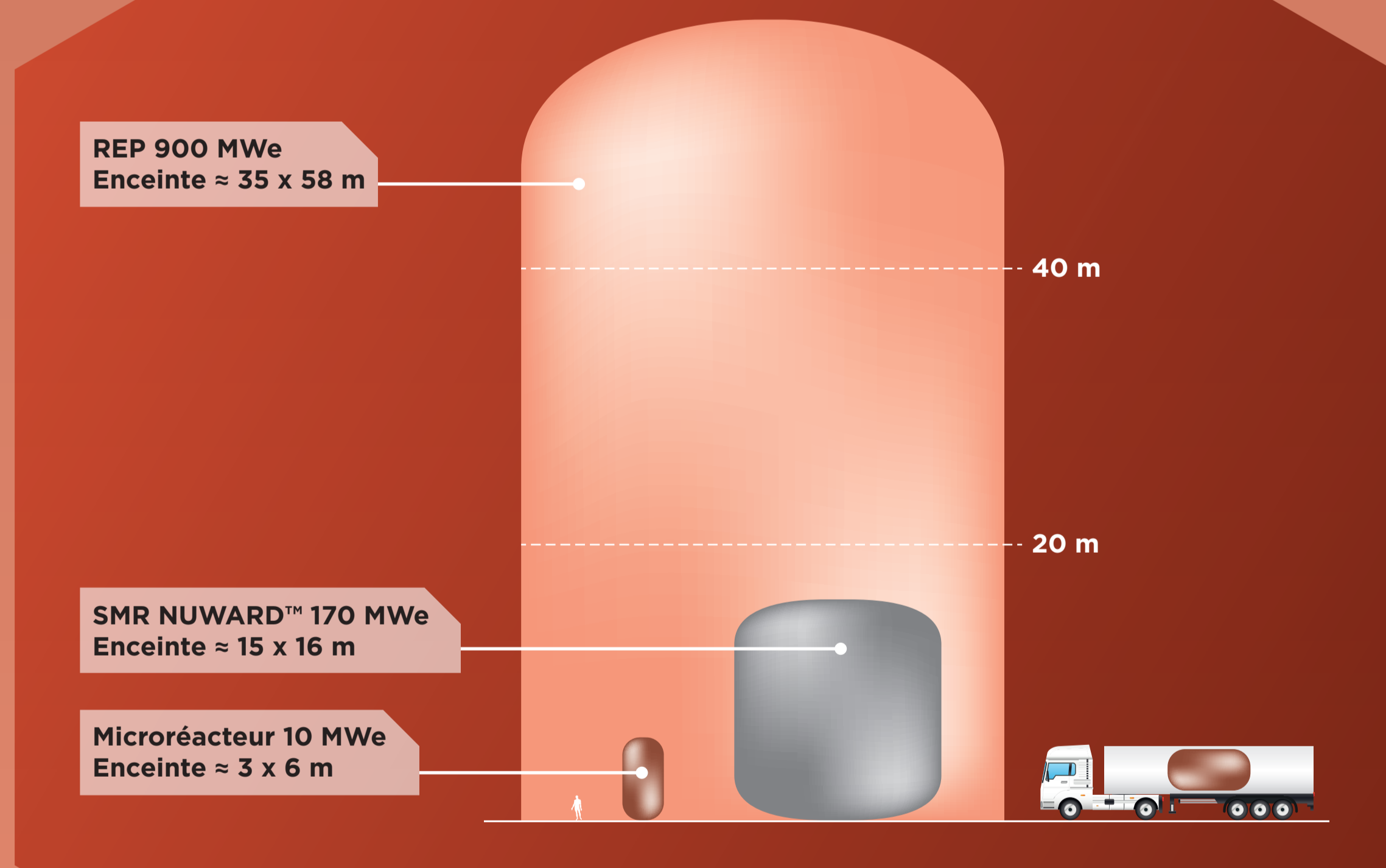
Les réacteurs nucléaires compacts sont utilisés depuis des décennies pour la propulsion navale. Pourtant, une nouvelle génération de petits réacteurs suscite un engouement ces dernières années à travers le monde : les « *Small Modular Reactors* » (SMR). Ces réacteurs ont une puissance inférieure à 300 MWe (1600 MWe pour un EPR).

Construits à partir de modules élémentaires fabriqués dans des usines dédiées et transportés par voies routière ou fluviale, les SMR sont assemblés sur le site d'exploitation. Les concepts sont nombreux (plus de 70) et reposent sur différentes technologies et générations des réacteurs.

Leur petite taille et leur faible puissance leur confèrent une plus grande sûreté. En cas d'incident ou d'accident, ils permettent d'amener le réacteur en état d'arrêt sûr et de l'y maintenir pendant une longue période sans intervention humaine.



Chaudière et enceinte NUWARD™ dans la vue d'ensemble du bâtiment nucléaire principal.



Encore plus petits que les SMR, les microréacteurs ont une puissance inférieure à 10 MWe (l'équivalent de 1 tonne de pétrole par heure). Extrêmement compacts, ils peuvent être facilement déplacés et intégrés dans des espaces très limités et utilisés dans des situations très particulières (alimentation électrique de territoires isolés, de modules spatiaux ou de base militaire en opération, intervention en situation de crise...).



## Et au-delà de l'électricité domestique...

La chaleur produite par les réacteurs nucléaires peut être utilisée pour autre chose que la production d'électricité : dessalement de l'eau de mer, chauffage urbain, procédés industriels très gourmands en énergie (chimie, papier, aciéries).

Leur utilisation peut aussi être considérée pour apporter des solutions aux besoins croissants locaux d'électricité comme l'alimentation des *data centers* de plus en plus nombreux !



## LES CENTRALES SONT-ELLES SÛRES ?

# LA FUSION NUCLÉAIRE



La fusion est le phénomène à l'œuvre dans les étoiles, comme notre soleil.

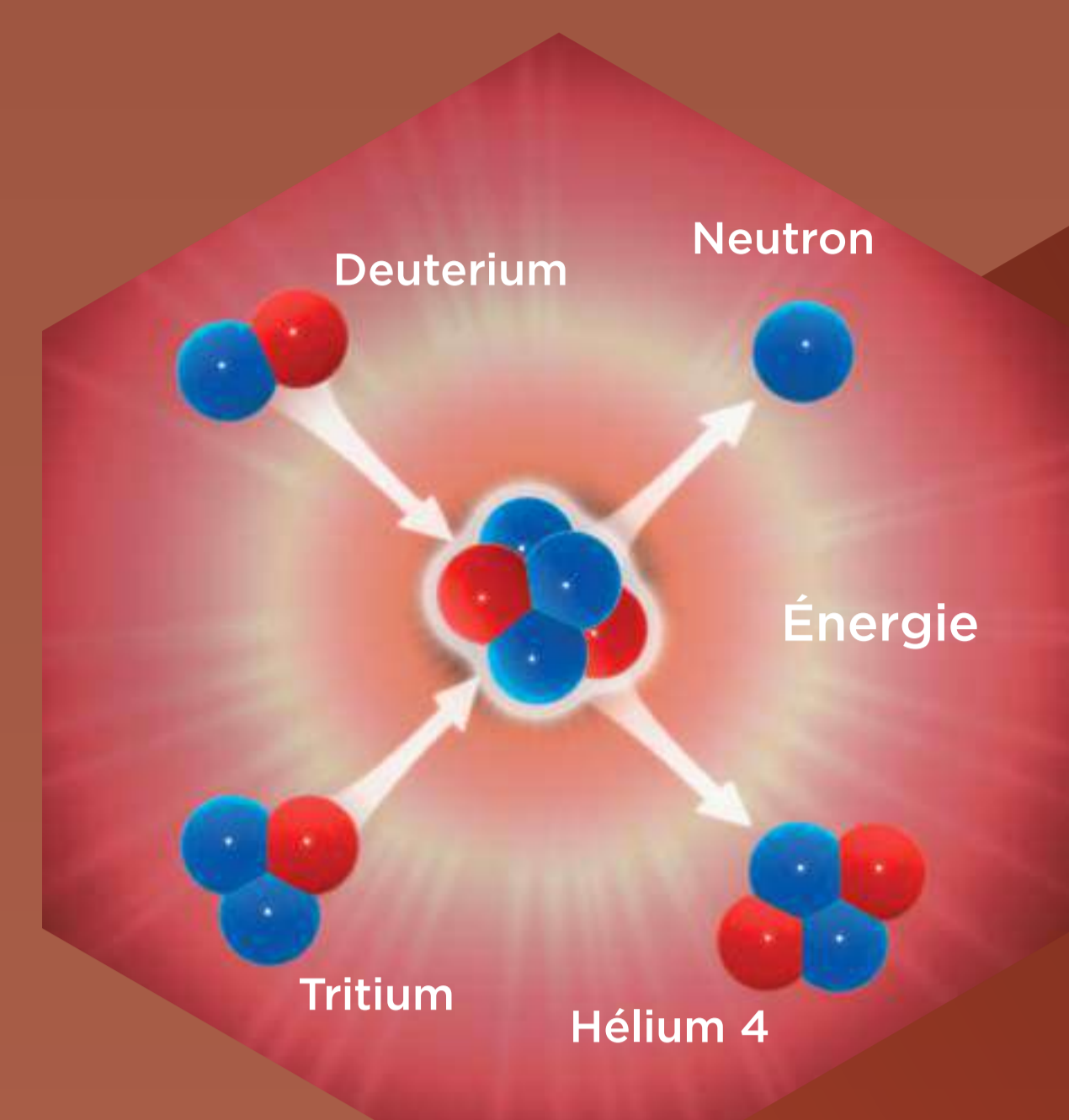
## LA FUSION, ÇA FONCTIONNE COMMENT ?

Dans le processus de fission, on casse des atomes lourds en plusieurs morceaux en les bombardant de neutrons.

Dans le processus de fusion, c'est l'inverse qui se produit : on comprime la matière avec une telle force que deux atomes légers s'assemblent en un seul atome plus lourd.

Les deux processus physiques libèrent de l'énergie mais la réaction de fusion a le double avantage théorique :

- de ne pas engendrer de sous-produits radioactifs de haute activité à vie longue ;
- d'utiliser un carburant qui peut être extrait de l'eau, une ressource très abondante. Néanmoins, le processus d'extraction du tritium étant très coûteux, des systèmes produisant du tritium sous le bombardement neutronique (comme les « couvertures tritigènes ») sont à l'étude.



Processus de fusion

## PRODUIRE LA RÉACTION FUSION

Les réactions de fusion nucléaire ont naturellement lieu au cœur des étoiles, comme dans le soleil, à des pressions et des températures extrêmes (de l'ordre de 200 milliards de fois la pression atmosphérique terrestre et de 150 millions de degrés Celsius). Dans ces conditions, la matière se présente sous forme d'un plasma : les noyaux et électrons les entourant ne sont plus liés.

Pour reproduire et contrôler ce processus de fusion sur Terre, il est donc nécessaire de pouvoir atteindre des pressions et températures élevées. Deux technologies sont possibles :

- **le confinement magnétique** : à l'intérieur d'un tokamak, le plasma, créé par un courant très puissant ainsi que des systèmes de chauffage additionnels, est « piégé » dans un champ magnétique créé par des bobines. Le combustible utilisé est un mélange d'isotopes de l'hydrogène ;
- **le confinement inertiel** : les conditions de température et de pression très élevées sont fournies par des lasers disposés autour du combustible, confiné dans un très petit volume. La pression exercée par les lasers et la chaleur produite permettent au combustible de devenir un plasma.

## LE LONG CHEMIN VERS L'INDUSTRIALISATION

La production d'électricité à grande échelle via la fusion nucléaire présente encore des verrous technologiques importants :

- le bilan entre l'énergie libérée et l'énergie fournie doit être positif. En effet, contrairement à la fission qui est entretenue par la réaction en chaîne, il faut apporter dans la fusion énormément d'énergie pour rapprocher les atomes les uns des autres ;
- la fusion doit perdurer. Le plasma présente de nombreuses instabilités intrinsèques : jusqu'à présent, le bilan positif a été maintenu pendant seulement quelques minutes.

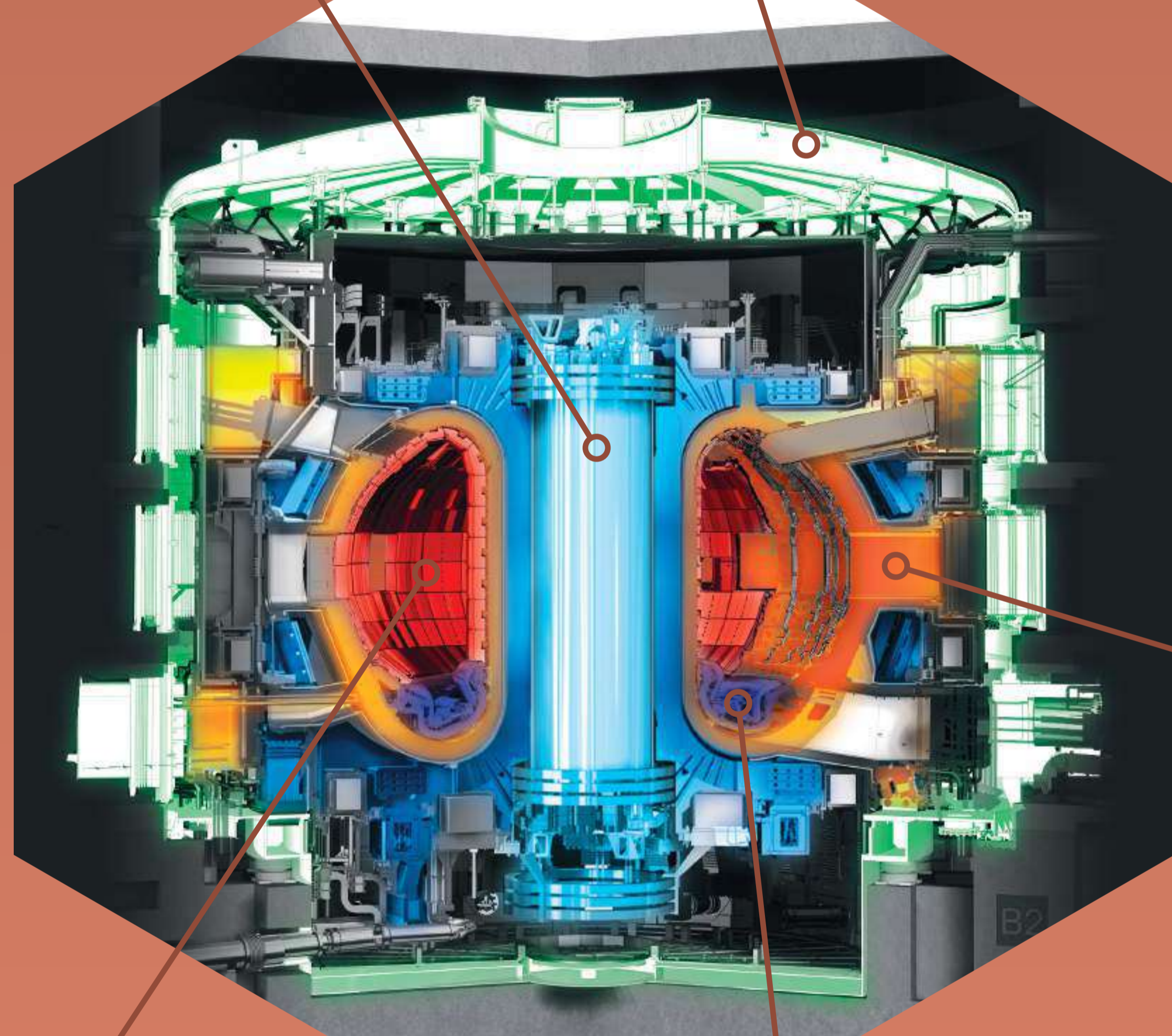
## TOKAMAK DU PROJET ITER

### AIMANTS

Le champ magnétique généré par 10 000 tonnes d'aimants supraconducteurs sera nécessaire pour confiner et modeler le plasma à l'intérieur de la chambre à vide.

### CRYOSTAT

Le cryostat est une grande structure en acier inoxydable (29 m x 29 m) qui enveloppe la chambre à vide et les aimants supraconducteurs, délimitant un environnement sous vide extrêmement froid.



### CHAMBRE À VIDE EN FORME DE TORE

La chambre à vide est une enceinte étanche en acier inoxydable dans laquelle se produiront les réactions de fusion.

### COUVERTURE

Les modules de couverture protègent la chambre à vide et les aimants supraconducteurs des neutrons de très haute énergie produits par la réaction de fusion.

### DIVERTOR

Le divertor, qui se trouve sur le « plancher » de la chambre à vide, assure l'extraction des effluents gazeux et des impuretés de la machine, et doit être capable de supporter des charges thermiques de surface très élevées.

## ITER, LE RÉACTEUR THERMONUCLÉAIRE EXPÉRIMENTAL INTERNATIONAL

ITER est un projet international de réacteur nucléaire de recherche civil à fusion nucléaire de type tokamak, situé à proximité immédiate du centre d'études nucléaires de Cadarache à Saint-Paul-lez-Durance (Bouches-du-Rhône, France). Son fonctionnement repose sur le principe de fusion thermonucléaire, alors que les réacteurs actuels utilisent la fission.

Le projet ITER vise à vérifier la faisabilité scientifique et technique de la fusion nucléaire comme nouvelle source d'énergie, dans le but de réaliser dans le futur des réacteurs commerciaux à fusion produisant de l'énergie électrique. Des chercheurs travaillent actuellement sur différents projets de réacteurs à fusion (projet européen DEMO par exemple).

Le projet associe de nombreux pays : ceux de l'Union européenne ainsi que l'Inde, le Japon, la Chine, la Russie, la Corée du Sud, les États-Unis, la Suisse et le Royaume-Uni.



## EN DÉBAT LA FUSION EST-ELLE PROPRE ?



Un réacteur à fusion ne produirait donc pas les mêmes déchets nucléaires que les centrales actuelles (produits de fissions, actinides, etc.) mais des déchets tritiés de plus faible activité et de moins longue durée de vie.



La réaction de fusion nécessite du tritium, corps radioactif. Même si la réaction de fusion nécessite peu de combustible (quelques grammes de tritium), environ 4 kg de tritium seront présents dans l'installation ITER. Les neutrons activent les structures métalliques du tokamak. Ces structures activées sont une source de déchets qui s'ajoutent aux déchets tritiés. Le volume total de déchets sera plus important que celui d'un réacteur actuel mais n'aura pas une haute activité. Par ailleurs, ces structures métalliques activées conduisent à des débits de dose tels que toute intervention humaine est impossible, ce qui implique la robotisation des opérations de maintenance.