



NEUTRON ET POLTRON

AU COEUR DU RÉACTEUR

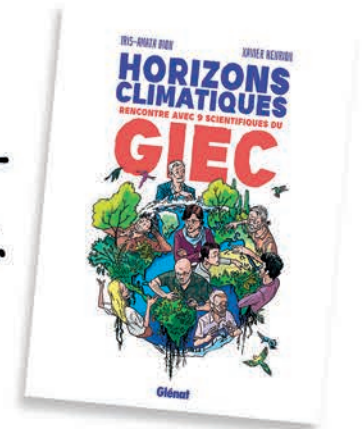
NEUTRON ET POLTRON

AU COEUR DU RÉACTEUR

Auteurs

Xavier Henrion Co-auteur de la bande dessinée *Horizons climatiques - Rencontre avec 9 scientifiques du GIEC*, aux éditions Glénat.

Franck Le Gall Enseignant de Physique à l'ISEN de Brest.



Expertise scientifique

Patrick Verhoeven Retraité EDF



Pour mesurer la radioactivité d'un élément, on dispose de trois unités...

Allez, racontez-moi tout.

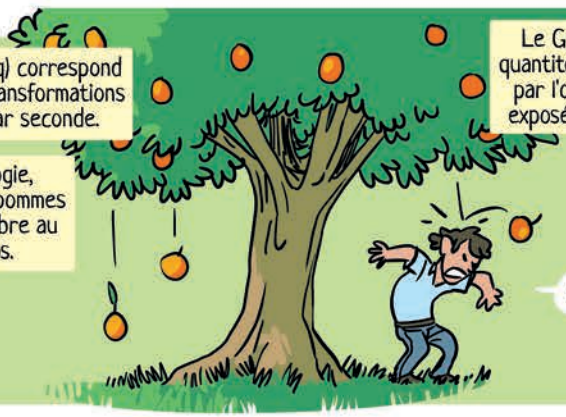
Tu fais quoi, là ?



J'en peux plus !
C'est sa faute !

Le Becquerel (Bq) correspond au nombre de transformations des atomes par seconde.

Dans cette analogie, c'est le nombre de pommes qui tombent de l'arbre au cours du temps.



Le Gray (Gy) mesure la quantité d'énergie absorbée par l'organisme ou l'objet exposé aux rayonnements.

Le nombre de pommes reçues par le personnage.

Le Sievert (Sv) sert à quantifier l'effet des rayonnements sur l'être.

Les marques laissées par les pommes sur le corps !

Oui, je m'intéresse beaucoup à la psychologie des noyaux instables...



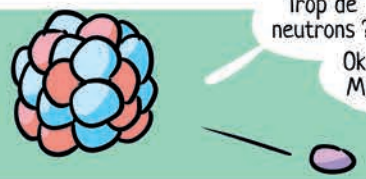
Le rayonnement alpha : il correspond à l'émission d'un noyau d'hélium : 2 protons et 2 neutrons.



Puisque c'est comme ça, on s'en va !

Sa portée est de quelques centimètres et une feuille de papier peut l'arrêter.

Le rayonnement bêta : un neutron se transforme en proton, ou inversement, et le noyau émet un électron ou un anti-électron.



Trop de neutrons ?

Ok, je me change... Me voilà proton !

Et moi, je vais voir ailleurs !

Il peut parcourir quelques mètres, mais est stoppé par une feuille d'aluminium.

En fonction de comment ils réagissent, leur pouvoir radioactif peut être plus ou moins dangereux...

... Tout dépend du type de rayonnement émis lors de leur transformation.

Le rayonnement gamma est émis par les atomes possédant un trop plein d'énergie. Il s'agit d'une onde électromagnétique pouvant parcourir plusieurs centaines de mètres.



RHAAAA !!

Pour le contenir, il faut une forte épaisseur de plomb ou de béton !

Heureusement, tous ces isotopes instables n'ont pas besoin de mon aide !



La plupart se calment tous seuls, plus ou moins rapidement.

Aujourd'hui, on va se concentrer sur un atome dont l'instabilité date de la naissance de la Terre !

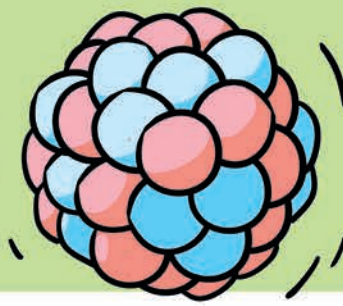


L'uranium 235 !!



Ah ! Je l'avais bien dit !!

C'est un isotope de l'uranium 238. Il ne représente que 0,7% de l'uranium total sur notre planète. 92 protons et 143 neutrons !



Si son instabilité date de si longtemps, c'est simplement que sa radioactivité est faible.

Pour nos centrales nucléaires, il va falloir intervenir...

AU COEUR DU RÉACTEUR

Mais alors, que se passe-t-il dans une centrale nucléaire ?

Dans une centrale, on va déstabiliser un peu plus l'uranium 235...

... et ça, grâce à moi !

Ah oui, toi, tu arrives et tu casses tout !

L' ^{235}U est fissile. Ça signifie que lorsqu'il absorbe un neutron, il devient instable et va fissionner en deux nucléides plus légers.

Ce faisant, sont libérés 2 ou 3 neutrons ainsi qu'une énergie considérable.

Les neutrons libérés peuvent être absorbés par d'autres noyaux d' ^{235}U et ainsi de suite pour participer à une réaction en chaîne.

Et l'énergie dégagée est utilisée sous forme de chaleur dans nos centrales nucléaires !

Cette réaction s'appelle la fission nucléaire !

Rayonnements alpha, bêta et gamma.

α, β, γ

Dans le réacteur, le défi va surtout être de contrôler cette réaction en chaîne.

De base, les neutrons libérés vont trop vite et s'échappent... La réaction s'arrête et le réacteur ne fonctionne pas.

Dans les réacteurs les plus courants aujourd'hui, les REP, réacteurs à eau pressurisée, tout se passe dans l'eau liquide.

L'eau ralentit les neutrons de façon à augmenter les chances de collisions avec de nouveaux noyaux d'uranium 235.

On dit alors que l'eau est le modérateur !

Hé hé... Maintenant, je sais comment te calmer si tu me cherches trop !

Ça, ce sont des barres de contrôle, principalement constituées d'argent. Elles sont capables de piéger les neutrons.

Elles peuvent être descendues pour réduire le taux de fission ou remontées pour le maintenir ou l'augmenter.

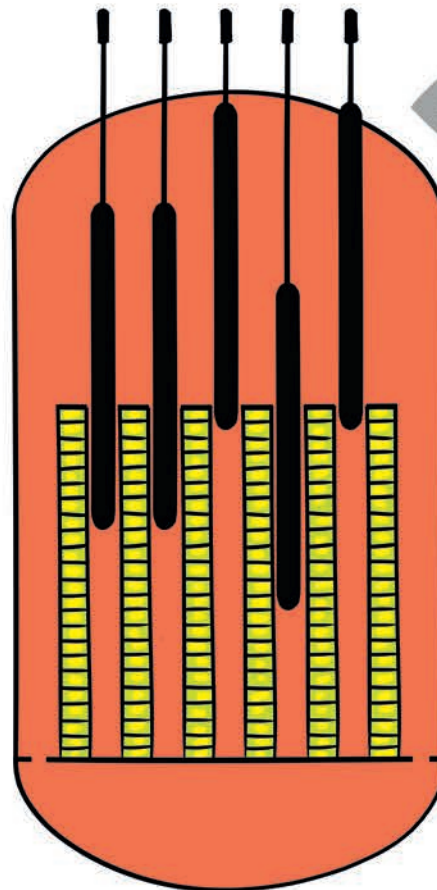
Le combustible est comprimé en pastilles. C'est de l'uranium enrichi, c'est à dire qu'on a augmenté la part d' ^{235}U de 0,7% à 4% en moyenne.

Les pastilles sont placées dans des gaines étanches appelées "crayons combustibles", dont on fait des assemblages.

Quand la fission nucléaire a lieu, elle dégage une forte chaleur qui est transmise à l'eau, qui ne bout pas parce qu'elle est sous pression.

L'eau va alors pouvoir transporter cette chaleur hors du coeur du réacteur.

L'eau est donc le modérateur mais aussi le caloporteur dans un REP !



AU COEUR DU RÉACTEUR

On vient de voir comment fonctionne le coeur du réacteur.

L'eau chauffée à cet endroit circule dans le circuit primaire, ici représenté en rouge clair.

Dans le réacteur l'eau est chauffée à environ 300°C puis arrive dans un échangeur de chaleur avec le circuit secondaire.

L'eau est sous pression pour ne pas bouillir grâce à un pressuriseur.

Les circuits primaires et secondaires sont complètement isolés l'un de l'autre.

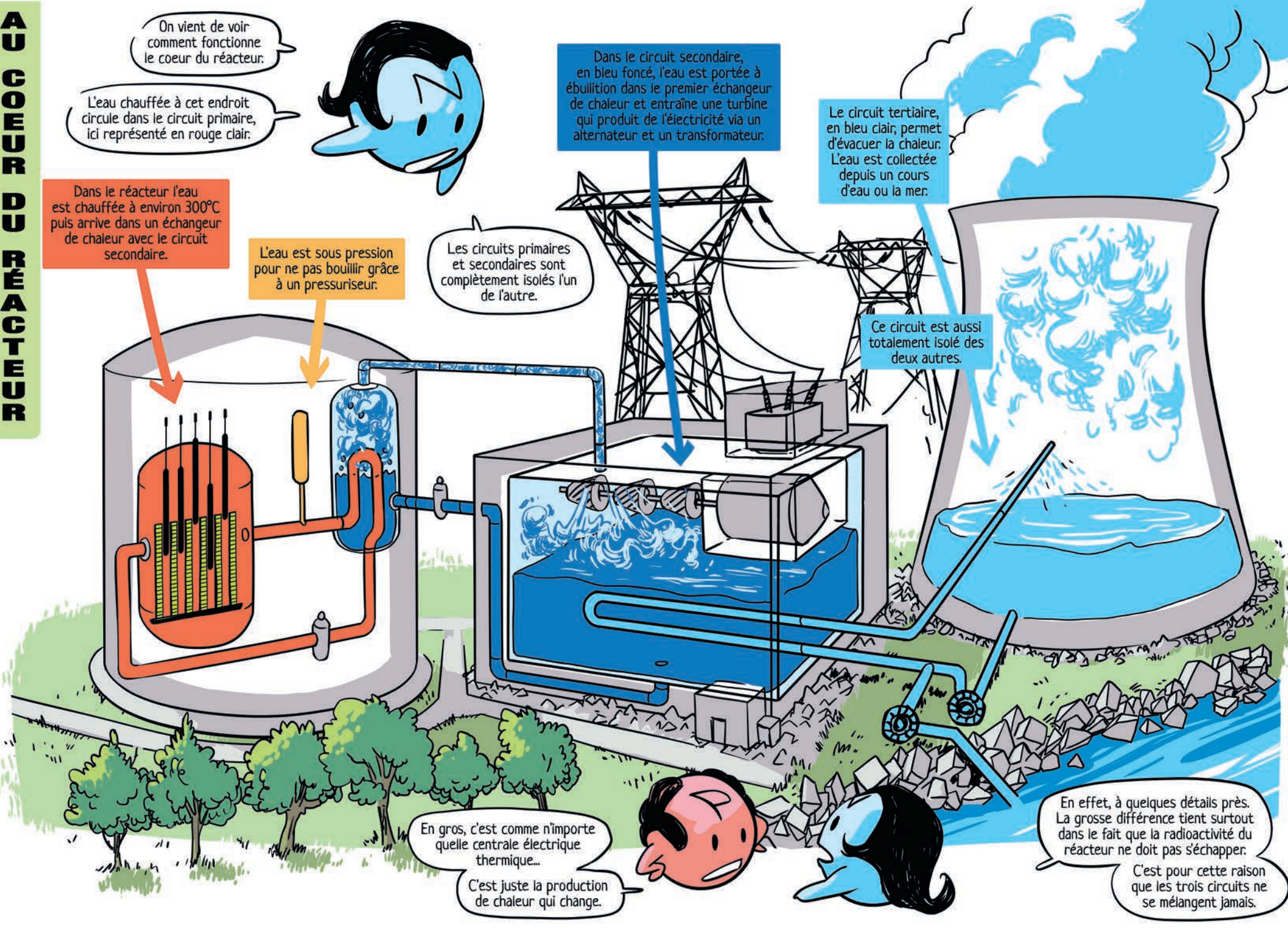
Dans le circuit secondaire, en bleu foncé, l'eau est portée à ébullition dans le premier échangeur de chaleur et entraîne une turbine qui produit de l'électricité via un alternateur et un transformateur.

Le circuit tertiaire, en bleu clair, permet d'évacuer la chaleur. L'eau est collectée depuis un cours d'eau ou la mer.

Ce circuit est aussi totalement isolé des deux autres.

En gros, c'est comme n'importe quelle centrale électrique thermique...
C'est juste la production de chaleur qui change.

En effet, à quelques détails près. La grosse différence tient surtout dans le fait que la radioactivité du réacteur ne doit pas s'échapper. C'est pour cette raison que les trois circuits ne se mélangent jamais.



LES DIFFÉRENTS TYPES DE RÉACTEURS



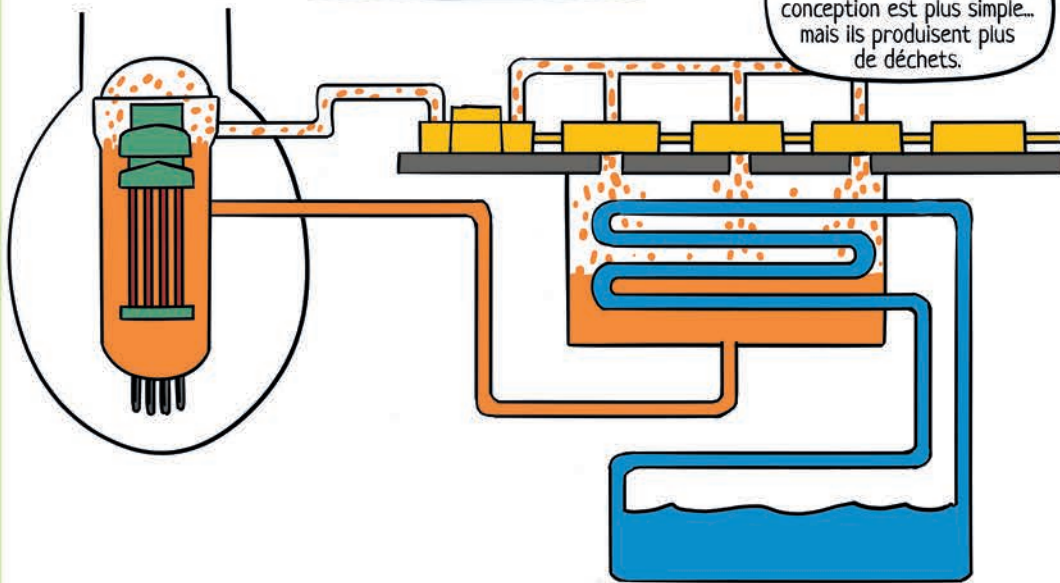
À côté des réacteurs à eau pressurisée, il existe d'autres types de réacteurs.

Si les REP représentent 55% du parc mondial, les réacteurs à eau bouillante, REB, ont tout de même une part de 22% dans le monde.

La principale différence tient au fait que l'eau n'est pas pressurisée. Ainsi, en chauffant elle bout et devient vapeur.

De plus, les circuits primaires et secondaires sont ici regroupés. L'eau évaporée va directement faire tourner les turbines avant d'être refroidie et réinjectée dans le cœur du réacteur.

Ce sont des réacteurs moins onéreux dont la conception est plus simple... mais ils produisent plus de déchets.



On peut aussi parler des réacteurs à eau lourde. Une technologie qui a beaucoup été poussée par les canadiens.

On parle d'eau lourde parce que les molécules d'eau sont composées d'un atome d'oxygène et de deux atomes de deutérium, un isotope de l'hydrogène deux fois plus lourd.

Ces réacteurs ont l'avantage de pouvoir être rechargés en combustible pendant qu'ils fonctionnent à plein régime.



Oui, bah, l'eau lourde, c'est pas pratique !

Il existe aussi de nombreux autres types de réacteurs, souvent encore à l'état de prototype.

La majorité des réacteurs en exploitation aujourd'hui sont de génération 2.



Les réacteurs de génération 3 mettent surtout l'accent sur un renforcement de la sûreté. Ils ont commencé à être développés après la catastrophe nucléaire de Tchernobyl.

Les EPR, pour European Pressurized Reactor, font partie de cette génération.

Quant à la génération 4, elle se base sur de nombreux objectifs de durabilité, de sûreté, de compétitivité et de lutte contre la prolifération des armes nucléaires.



LES AVANTAGES

Attends... Tu parles d'armes nucléaires ? C'est quoi cette histoire ? Je croyais qu'on parlait de moyen de production d'électricité, là !



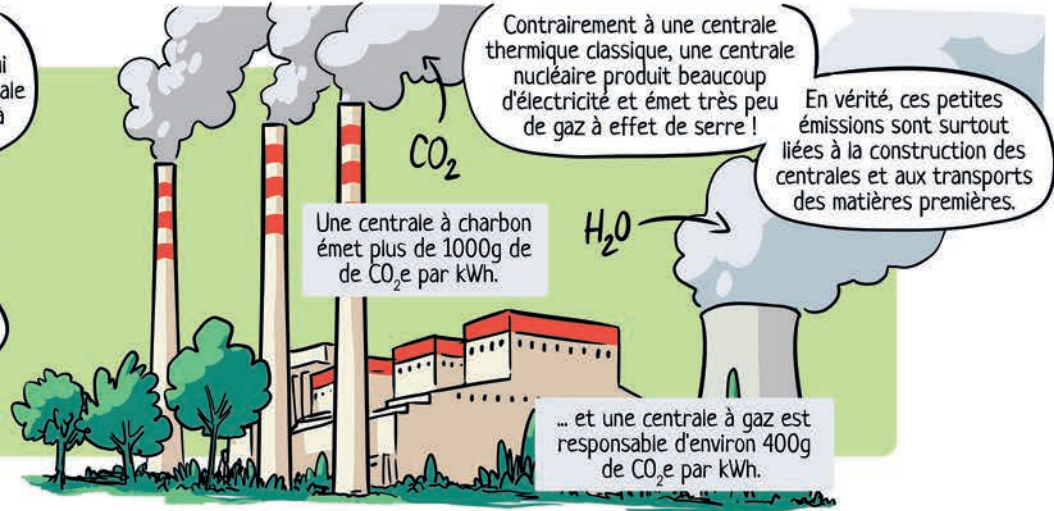
Il y a des points noirs dans l'industrie nucléaire. Mais avant de les aborder, regardons quels en sont les avantages.



Tu n'es pas sans ignorer que nous avons un souci de climat qui se réchauffe dont la cause principale est liée à nos émissions de gaz à effet de serre.

Ces gaz sont émis dans l'atmosphère lorsqu'on brûle du charbon, du pétrole ou du gaz...

... et souvent, on fait ça pour produire de l'électricité !



Contrairement à une centrale thermique classique, une centrale nucléaire produit beaucoup d'électricité et émet très peu de gaz à effet de serre !

En vérité, ces petites émissions sont surtout liées à la construction des centrales et aux transports des matières premières.

Pour produire de l'électricité décarbonée, on évoque souvent les panneaux photovoltaïques et les éoliennes.



Ce sont de formidables technologies qui évoluent rapidement et on doit clairement s'appuyer dessus !

Cependant, elles ont deux défauts plutôt contraignants.

Ensuite, ce sont des moyens de production intermittents : quand il n'y a pas de soleil, les panneaux photovoltaïques ne fonctionnent pas.

De même, sans vent, pas d'éoliennes !

Une centrale nucléaire, en France, émet 6g de CO₂e par kWh.

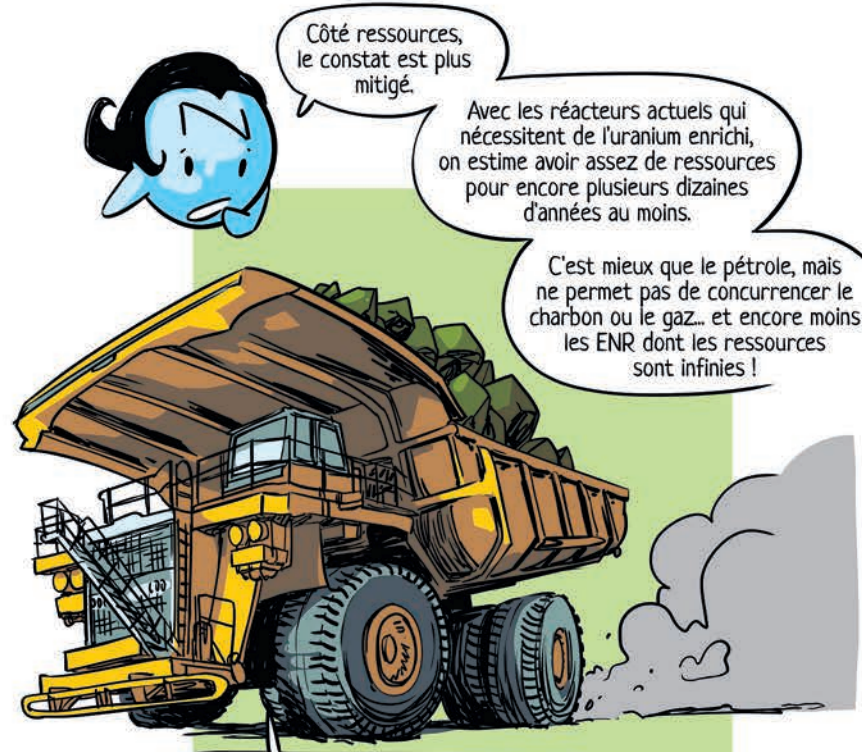
Tout d'abord, elles prennent beaucoup de place !

Par exemple, il faut des centaines d'éoliennes pour produire autant d'électricité qu'une centrale nucléaire !

Une éolienne, entre 14 et 16g de CO₂e par kWh.

Un panneau photovoltaïque, entre 25 et 45g de CO₂e par kWh.

Une centrale nucléaire est pilotable. Elle permet d'adapter la production à la consommation et de fonctionner facilement en réseau.



Côté ressources, le constat est plus mitigé.

Avec les réacteurs actuels qui nécessitent de l'uranium enrichi, on estime avoir assez de ressources pour encore plusieurs dizaines d'années au moins.

C'est mieux que le pétrole, mais ne permet pas de concurrencer le charbon ou le gaz... et encore moins les ENR dont les ressources sont infinies !

Cependant, les réacteurs de génération 4 envisagent de nombreuses possibilités de réutilisation des déchets ou d'utilisation d'autres combustibles que l'uranium, comme le thorium par exemple.

Si ces réacteurs étaient développés, les ressources ne seraient plus un souci avant des milliers d'années !

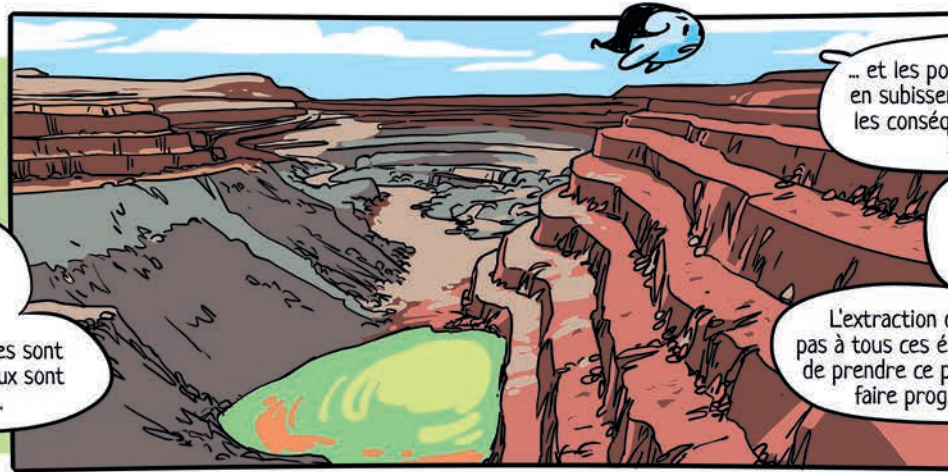
Et puisque l'on parle des mines, il est temps d'aborder les inconvénients liés à l'industrie nucléaire.



Les mines sont polluantes. Que ce soit pour extraire du charbon, du cuivre, de l'or ou du lithium.

Des tonnes de matière sont sorties de terre pour récupérer quelques kilogrammes de minerais.

Des écosystèmes sont détruits, les eaux sont polluées...



... et les populations locales en subissent aussi souvent les conséquences sur leur santé.

Elles sont même parfois exploitées pour travailler dans les mines dans des conditions déplorables.

L'extraction de l'uranium n'échappe pas à tous ces écueils et il est nécessaire de prendre ce problème au sérieux pour faire progresser ce secteur !

OK... Effectivement, c'est pas joli à voir. Je n'y avais même pas pensé.

Oui, les impacts liés au secteur de la mine sont souvent ignorés du grand public.

Mais cet aspect n'est pas spécifique au nucléaire, pas comme le problème de la prolifération des armes dont on parlait précédemment.

En effet, les technologies du nucléaire civil et du nucléaire militaire sont très proches, et les pays possédant des centrales peuvent être tentés de se doter de l'arme nucléaire.

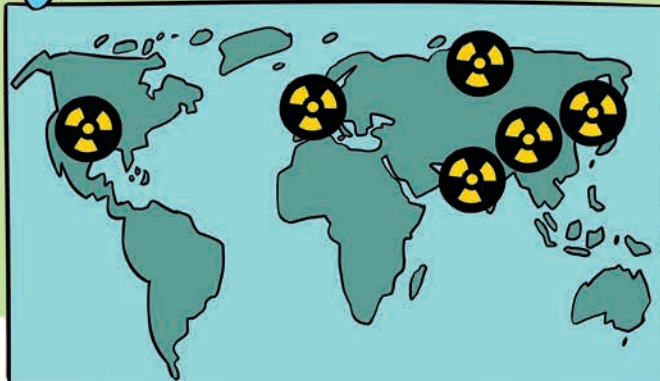
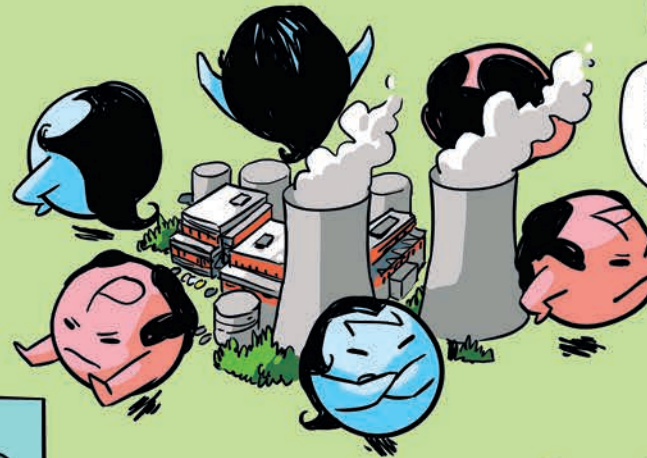
Ce n'est pas facile de passer de l'un à l'autre mais ça reste un risque qu'il ne faut pas négliger.

Des accords ont été passés entre les pays, mais, comme souvent, ils sont non contraignants et on ne sait pas toujours vraiment s'ils sont respectés...

Dans le même genre, sans parler d'armes, une centrale reste un point stratégique qui doit être particulièrement protégé. Tout comme nous devons protéger les barrages !

Une attaque militaire ou terroriste peut faire des dégâts considérables si elle touche l'une de ces installations !

Et les enjeux de sûreté s'étendent aussi aux catastrophes naturelles. À Fukushima, en 2011, l'accident a eu lieu à cause d'un tsunami.



Pour toutes ces raisons, nombreux sont celles et ceux qui luttent contre le déploiement des centrales nucléaires.

Et le fait qu'on ait besoin d'une solution décarbonée rapidement n'aide pas : construire de nouveaux réacteurs susceptibles de prendre en compte les nouvelles technologies prend du temps !

Bon, Neutron, ça fait quelques inconvénients non négligeables, et on a pas mal de travail de ce côté-là...

... mais il y a un sujet qu'il va falloir aborder. Même moi, j'ai entendu parler du problème des déchets nucléaires !



Tu as raison. Avec les soucis de sûreté, ce sont les thèmes les plus clivants.

Malgré tout, en introduction, je pense qu'il est nécessaire de préciser que la production d'électricité est responsable, en France, de 60% du volume de déchets nucléaires.

En effet, les propriétés de la radioactivité sont utilisées dans de nombreuses autres applications.



La recherche, la défense nationale, la médecine ou encore l'industrie classique trouvent aussi des utilisations bien pratiques à la radioactivité.

Et ils produisent également des déchets qu'il faut traiter.

En France, c'est l'Andra qui est chargée de la gestion de ces déchets.

La consommation d'électricité par habitant en génère environ 2kg par an.

Par comparaison, la masse de déchets non radioactifs mais hautement toxiques est de 100kg par an et par habitant.



Revenons rapidement à nos noyaux instables.

On l'a dit, ils retrouvent naturellement une forme stable avec le temps.



Grrr !!



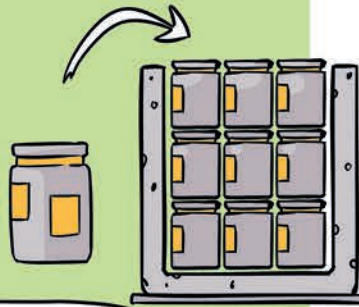
Je me sens mieux.

Les déchets à vie courte sont principalement des déchets d'exploitation et des déchets de déconstruction.

Ils représentent 90% du volume total des déchets radioactifs et contiennent 0,1% de la radioactivité totale.



Ils sont compactés dans des fûts en acier ou en béton pour être transportés et entreposés dans des cellules de béton au centre de stockage de l'Andra, à Soulaïnes ou à Morvilliers, dans l'Aube.



Ils perdent la moitié de leur radioactivité sur des durées inférieures ou égales à 31 ans...

... et sont donc presque complètement inactifs au bout de 300 ans.

Et certains plus vite que d'autres...

Ainsi on sépare les déchets radioactifs en deux catégories principales : les déchets à vie courte et les déchets à vie longue.

Les déchets à vie longue sont surtout les résidus du combustible nucléaire et représentent 10% du volume total en concentrant 99,9% de la radioactivité ! Ça correspond à 7g par an et par français.

Ils sont transportés puis traités à l'usine ORANO de La Hague.

Fatigué... mais toujours tendu !



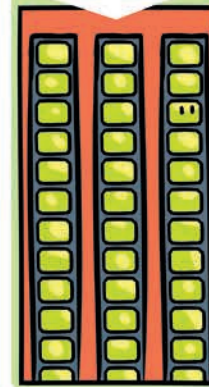
95% sont recyclés sous la forme de nouveaux combustibles utilisables dans les centrales ou en matière valorisable.

Les 5% restants sont appelés "déchets ultimes".

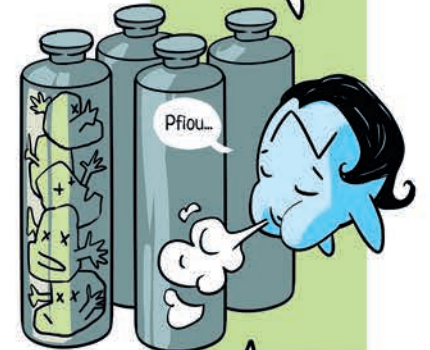
Rhaaa !!



Et hop ! De retour dans les barres de combustibles !



Ils sont vitrifiés et entreposés à La Hague.



Ces déchets ultimes demeurent actifs pendant plus de 300 ans, voire des milliers d'années pour les plus radioactifs !

Des centaines, voire des milliers d'années? C'est pas un peu étrange de produire des déchets qu'on ne sait pas gérer?

C'est clair que là aussi, on a besoin de faire des progrès.



En attendant, il y a le projet CIGEO, Centre Industriel de stockage GÉologique.

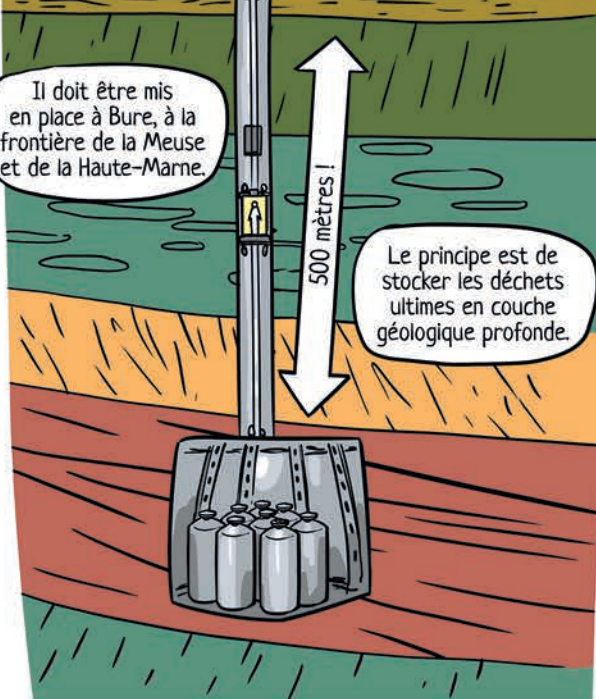


Hey! Nous, on n'est pas d'accord!

Il doit être mis en place à Bure, à la frontière de la Meuse et de la Haute-Marne.

500 mètres!

Le principe est de stocker les déchets ultimes en couche géologique profonde.



Les réacteurs de génération 4 ont parmi leurs objectifs, la réduction des déchets. C'est une autre façon de s'attaquer au problème...



On a déjà évoqué les réacteurs au thorium mais penchons-nous plutôt sur le cas des réacteurs à neutrons rapides, dits RNR.

Dans les RNR, on ne cherche plus à ralentir les neutrons pour augmenter les réactions de fission dans les barres de combustibles.

En spectre rapide, tous les isotopes du plutonium sont fissiles, ils peuvent donc fonctionner en multi-recyclage!

De plus, l'uranium naturel, ^{238}U , qui constitue une grande partie des déchets puisqu'il n'a pas fissionné, peut capturer un neutron et devenir du plutonium.

On dit que l'uranium est fertile puisqu'il génère du plutonium, fissile, en captant un neutron.



Les RNR peuvent donc être sousgénérateurs (consommateurs de plutonium) ou surgénérateurs (producteurs de plutonium), selon la mise en place ou non de couvertures fertiles.

Dans les EPR, 95% des déchets à vie longue sont réutilisés après traitement sous forme de mélanges d'oxydes, le MOX.

Le MOX est constitué d'oxydes de plutonium et d'uranium. Le plutonium peut à nouveau absorber un neutron et fissionner. Seulement...

... avec des neutrons lents, il ne peut être réutilisé de cette façon qu'une seule fois!

Ils m'ennuient ces neutrons tout mous. C'est la dernière fois que je viens jouer avec eux.



Ah! Là on s'éclate! Je reviens quand vous voulez!

On met alors en place une couverture fertile sur les parois du réacteur. Ces noyaux d'uranium sont donc bombardés par les neutrons n'ayant pas engendré de réaction de fission...

Et génère du plutonium qui pourra être utilisé dans le MOX!

On attrape ceux qui cherchent à s'échapper!

En fonctionnant en parallèle des REP, ils permettent une réduction importante des déchets ultimes.



LA FUSION NUCLÉAIRE

Enfin dans un avenir plus lointain encore, des chercheurs espèrent parvenir à reproduire la réaction qui a lieu au sein même du Soleil : la fusion nucléaire.



À l'inverse de la fission où l'on casse un noyau lourd en deux autres plus légers, la fusion consiste en un processus où deux noyaux légers s'unissent pour en former un plus lourd.

Cette réaction libère quatre fois plus d'énergie que la fission !



Fuuu...



Malheureusement, pour que deux noyaux puissent s'approcher très près l'un de l'autre, ils doivent surmonter leur répulsion électrique mutuelle...

Dans le Soleil, ils peuvent y parvenir grâce à une température de plus de 10 millions de degrés Celsius et une pression extrême.



Parvenir à recréer de telles conditions sur Terre n'est pas une mince affaire !

Fait chaud là-dedans !

Le problème principal est de réussir à obtenir plus d'énergie qu'il n'a fallu en dépenser pour initier cette fusion nucléaire.

Aujourd'hui la recherche se concentre sur la fusion de deux formes lourdes de l'hydrogène : le deutérium et le tritium.

Quoi qu'il en soit, si nous parvenons à maîtriser cette réaction, nous aurions alors accès à une énergie presque illimitée, propre, sûre et à un coût abordable.



Vous croyiez vraiment que ce serait aussi facile que dans un manga ?!



C'est beau tout ça, mais c'est aujourd'hui que nous avons besoin de trouver une solution pour notre consommation d'énergie toujours plus grande.

Oui. Et il faut garder en tête que si la fusion nucléaire est pleine de promesses, ce sont les activités humaines qui compromettent l'habitabilité de la planète.



N'oublions pas avant tout de remettre en cause nos modes de vie !

Livres sur le nucléaire...

Le nucléaire expliqué par des physiciens, EDP Sciences (2012),
par Bernard Bonin.

Comprendre le nucléaire en 1 heure - Comment ça marche, pourquoi ça fait peur, et pourquoi ça change tout, Promethis (2024).

Le nucléaire : une énergie vraiment sans danger ? Éditions Dunod (2025),
par Bruno Chareyron.

BD sur le nucléaire...

Un printemps à Tchernobyl, Futuropolis (2012),
par Emmanuel Lepage.

Fukushima - Chronique d'un accident sans fin, éditions Glénat (2021),
par Bertrand Galic et Roger Vidal.

Le monde sans fin, éditions Dargaud (2021),
par Jean-Marc Jancovici et Christophe Blain.

Et d'autres liens et références bibliographiques via ce QR code :



BD "Nucléaire" : un projet de vulgarisation des savoirs

Ce projet a pour objectif de rendre accessible au plus grand nombre les enjeux liés à l'énergie nucléaire, à travers une présentation claire et concise.

Conçu par des scientifiques experts dans le domaine, il s'appuie sur des sources officielles, dont les références sont indiquées en fin de document. Ce projet de diffusion se décline en deux supports complémentaires :

Un support de présentation type PowerPoint

Conçu pour une intervention d'une heure et destiné à un public de collégiens de 3^e ou de lycéens de 2nde, ce support vise à offrir une vue systémique des enjeux liés à l'énergie d'origine nucléaire.

Un support papier sous forme de Bande Dessinée

Cette version condensée reprend l'essentiel de la présentation orale, et permet de synthétiser de manière ludique et visuelle les principales informations.

Tous les documents sont libres de droits et peuvent être utilisés par le plus grand nombre.

