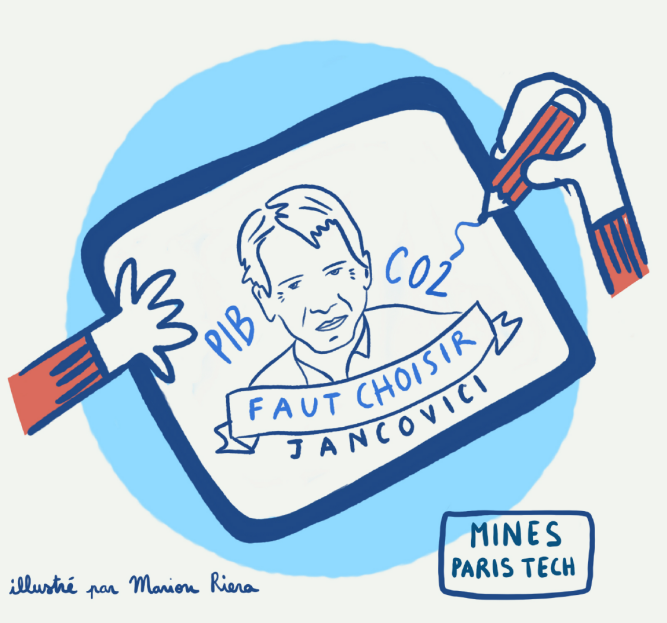
Transcription des cours magistraux de
Jean-Marc Jancovici

Éléments de base sur l'énergie au XXIe siècle
Partie 6 – E = mc^2, il suffisait d'y penser…



Cours magistraux dispensés à MINES ParisTech
Année scolaire 2018 – 2019

The Shifters, 2019.

AVERTISSEMENT

Ce document a été réalisé par les membres de l'association de loi 1901 The Shifters au cours du second semestre 2019.

Il contient une transcription écrite d'une des interventions filmées de Jean-Marc Jancovici à MINES ParisTech au cours de l'année scolaire 2018-2019.

Cette transcription a été réalisée dans le but d'être la plus fidèle possible aux propos tenus par l'orateur lors de son intervention. Cependant, comme toute transcription écrite de propos tenus oralement, celle-ci est nécessairement imparfaite, et certains éléments du discours original ont été supprimés ou révisés – quoique de façon marginale – afin d'obtenir un texte plus fluide.

L'intervention filmée originale est consultable à l'URL suivante:

https://www.youtube.com/watch?v=t0Xp6CCte0U

Ce document est placé sous license CC-BY-NC-SA. Il est librement distribuable, sauf à des fins commerciales. Dans le cas où ce document servirait à produire des créations dérivées, il convient aux auteurs de ces créations dérivées de faire mention de la provenance du présent document et de placer ces créations dérivées également sous licence CC-BY-NC-SA.

Table des matières

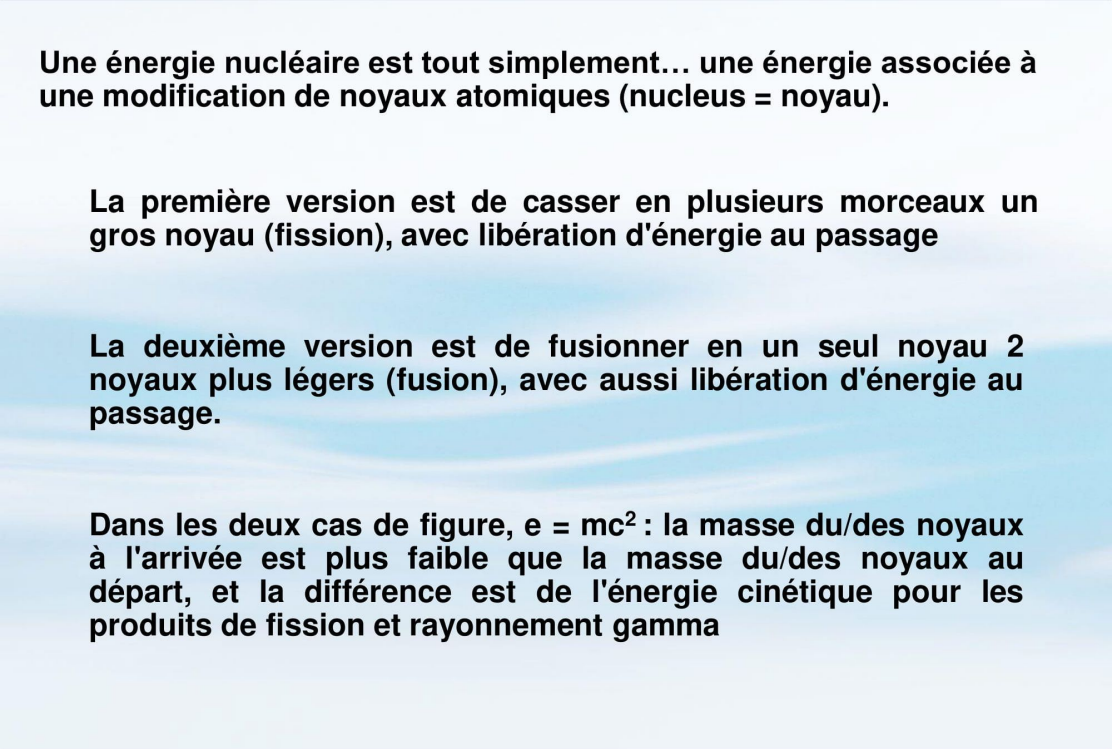
Introduction 1
1 Qu'est-ce que l'énergie nucléaire ? 2
2 Fusion et fission, deux manières de viser la stabilité 4
3 L'énergie nucléaire, ça décoiffe 5
4 Le nucléaire, c'est d'abord la vie… 7
5 Le nucléaire est la base de toute notre énergie… 8
6 D'abord se taper dessus, ensuite penser à autre chose 9
7 Si on reste pacifique, c'est quoi l'idée de départ ? 11
8 Nucléaire ou charbon, c'est – presque – pareil 12
9 Le nucléaire, vraiment trop mauvais ? 14
10 L'atome, une affaire récente 15
11 Certains se sont déjà arrêtés (pour le moment) 16
12 D'autres ont mis la centrale sur la mauvaise plage 18
13 D'autres ont peu de plages mais quelques électeurs 19
14 D'autres mettent le paquet 20
15 D'autres mettent le paquet (bis) 21
16 D'autres voudraient bien, mais ne peuvent point 22
17 D'autres ont dit qu'ils feraient sans, sauf que… 24
18 D'autres ont dit qu'ils aimaient, et puis non, et oui, et non… 26
19 D'autres « explosent », puis « redémarrent » 27
20 Atome, qui en fait finalement ? 28
21 Atome, qui en fait beaucoup en proportion ? 29
22 Atome, qui en fait beaucoup en proportion ? (bis) 30
23 La fission : smaller is beautiful 31
24 La fission, c'est le grand bazar… 33
25 Après une fission, c'est le grand bazar… (bis) 35
26 Après une fission, c'est le grand bazar… (ter) 39
27 Vous n'aimez pas les lents ? Prenez le rapide 40
28 La bouilloire se perfectionne, bien sûr… 43
29 Combustible ? 45
30 Entrez dans la ronde… 46
31 Plus fort que les Jivaros : la réduction des poids 50

32 Combien de kWh pour combien de kWh ? 52
33 kWh or not kWh : il faut compter. 54
34 Le kWh nucléaire est sensible au prix de l'U, mais pas trop 55
35 Bien plus important : le coût de l'argent 57
36 CO_2 or not CO_2 : il faut compter. 59
37 . . . mais le public n'en tient pas toujours compte ! 61
38 L'avis qu'on en a 63
39 Ce que disent les chiffres 65
40 En démocratie, ce que pense l'électeur, non les faits 68
41 Le nucléaire, parfois sujet préféré des journalistes 70
42 On joue au petit jeu des réserves ? 71
43 On joue au petit jeu des exponentielles ? 73
44 Combustible, mais ne se consume pas ! 75
45 Les déchets, quelques ordres de grandeur 77
46 Les déchets, quelques ordres de grandeur (bis) 78
47 Un exemple de poubelle 79
48 Et une poubelle naturelle ! 81
49 Le déchet nucléaire ne le reste pas indéfiniment 83
50 L'égalité n'existe pas plus devant la radioactivité 84
51 Nous sommes tous irradiés, c'est juste une question de dose . . . 86
52 Est-ce Tchernobyl ? 87
53 La relation linéaire dose-effet sans seuil, commode mais faux . . 89
54 Les doses ne se mesurent pas, elles se calculent 91
55 Quand les études épidémiologiques existent, quid ? 92
56 J'aime les Nations Unies. . . ou pas ! 94
57 Les antinucléaires, en phase avec les Nations Unies ? 96
58 Les médecins sont-ils tous tombés sur la tête ? 98
59 Centrales (maintenant) = bombinettes (plus tard) ? 99
60 Peut mieux faire ! 101
61 Les projets dans les cartons 102
62 Rappel : le but du jeu, c'est d'essayer ça 103
63 Le nucléaire peut-il faire +5% par an ? 104
64 Et la fusion ? 111
65 La fusion, c'est mieux que la fission ? 112

Introduction

Aujourd'hui, on va vous parler du sujet préféré des Français quand il s'agit de débattre de l'énergie, c'est-à-dire du nucléaire.

1. Qu'est-ce que l'énergie nucléaire ?



Diapositive 2.

Comme vous le savez, avec les atomes, on peut « faire interagir un atome avec de l'énergie » de deux manières. Enfin, il y a deux manières distinctes – je ne sais pas comment il faut le dire exactement – d'avoir de l'énergie impliquée dans quelque chose qui se passe au niveau d'un atome :

— Vous pouvez avoir un ré-arrangement des couches électroniques et à ce moment, ça s'appelle une excitation ou une réaction chimique.

— Vous pouvez avoir un ré-arrangement des nucléons et à ce moment, ça s'appelle une énergie nucléaire.

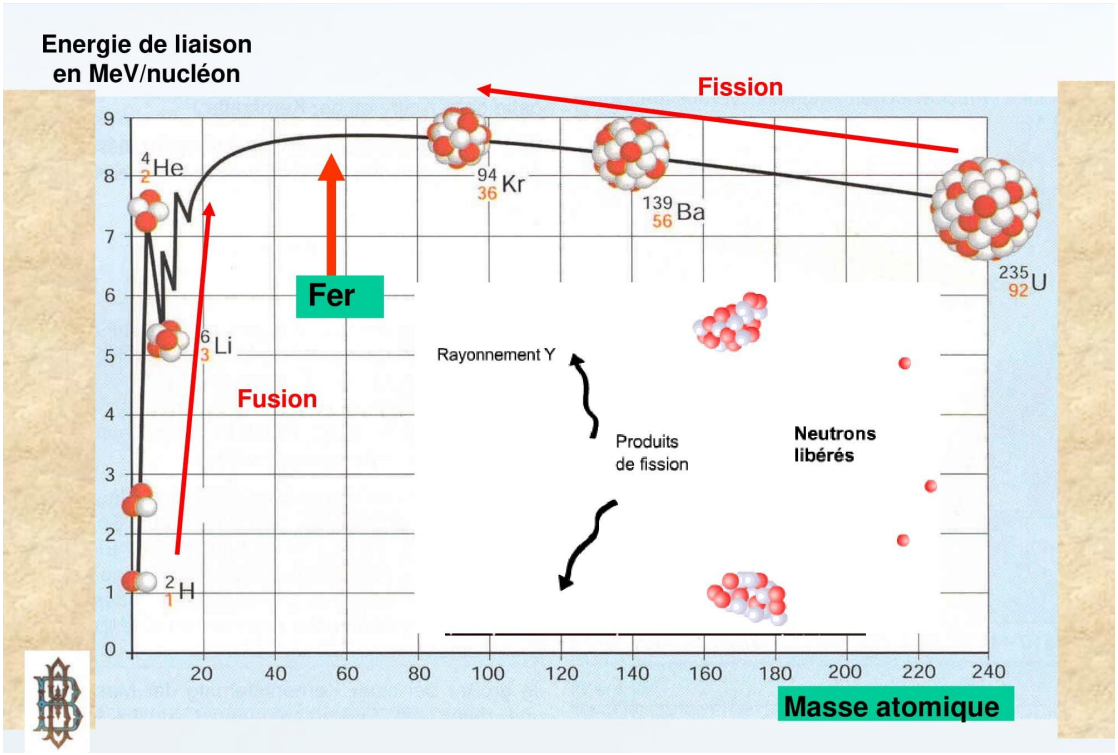
Donc l'énergie nucléaire, c'est l'énergie du ré-arrangement des nucléons que vous pouvez avoir avec des noyaux atomiques. Il y a deux manières d'avoir de l'énergie nucléaire :

— La première, c'est l'énergie qui est associée à la fission. La fission, c'est quand on prend un gros noyau, on le casse en deux gros morceaux et en plein d'autres petits, et ça c'est une réaction qui libère de l'énergie.

— La deuxième manière, vous allez voir pourquoi, c'est au contraire de prendre des noyaux très légers et de les fusionner. Et à ce moment, c'est pareil, vous avez de l'énergie qui est disponible.

En gros dans les deux cas de figure, il faut qu'on profite du fait que l'énergie de liaison dans les noyaux n'est pas la même quelle que soit la taille du noyau.

2. Fusion et fission, deux manières de viser la stabilité



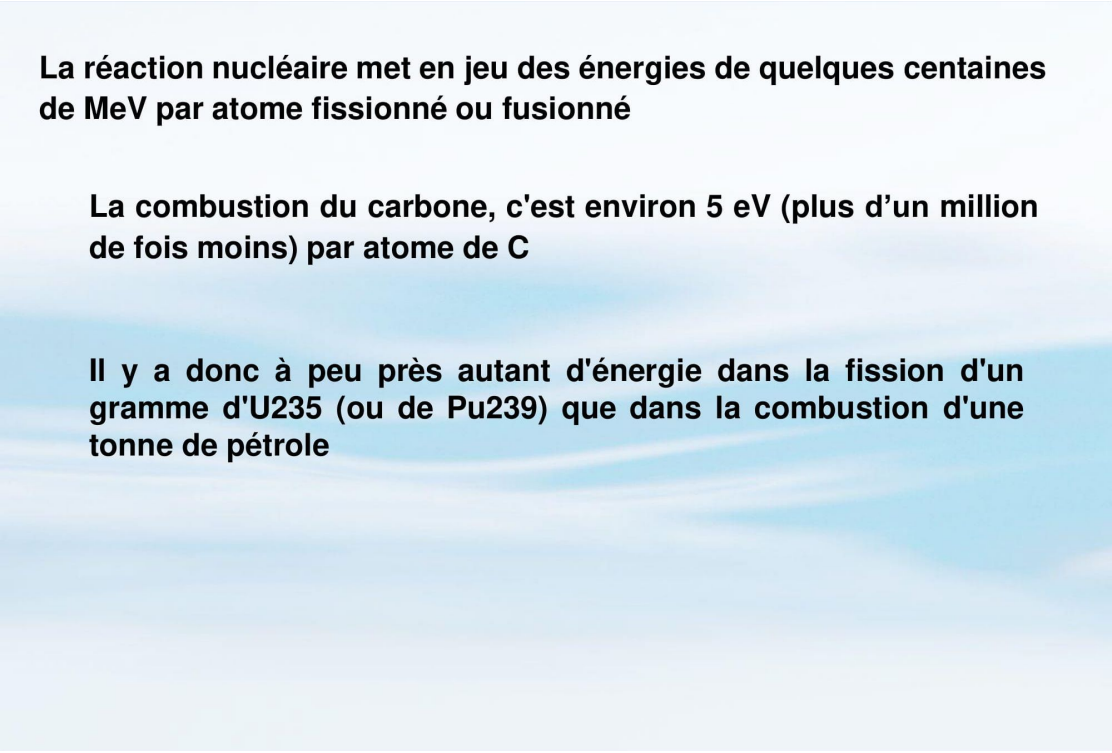
Diapositive 3.

Et donc, dans les petits et les très gros noyaux, l'énergie de liaison est un peu plus faible que dans les noyaux intermédiaires, et donc en réarrangeant la taille des noyaux, vous pouvez obtenir de l'énergie. Donc en gros :

— Ou bien vous faites de la fission qui consiste à casser le noyau en deux avec libération d'énergie qui, comme on va le voir, est essentiellement contenue soit dans du rayonnement électromagnétique, soit dans l'énergie cinétique des bouts de noyaux, donc des petits noyaux produits par la fission.

— Soit on fait l'exact inverse, c'est-à-dire qu'on fait de la fusion, c'est-à-dire qu'on assemble – en fait on joue au Lego. Et à ce moment, le différentiel d'énergie de liaison se retrouve libéré dans l'environnement sous forme également d'énergie cinétique et de rayonnement électromagnétique.

3. L'énergie nucléaire, ça décoiffe



Diapositive 4.

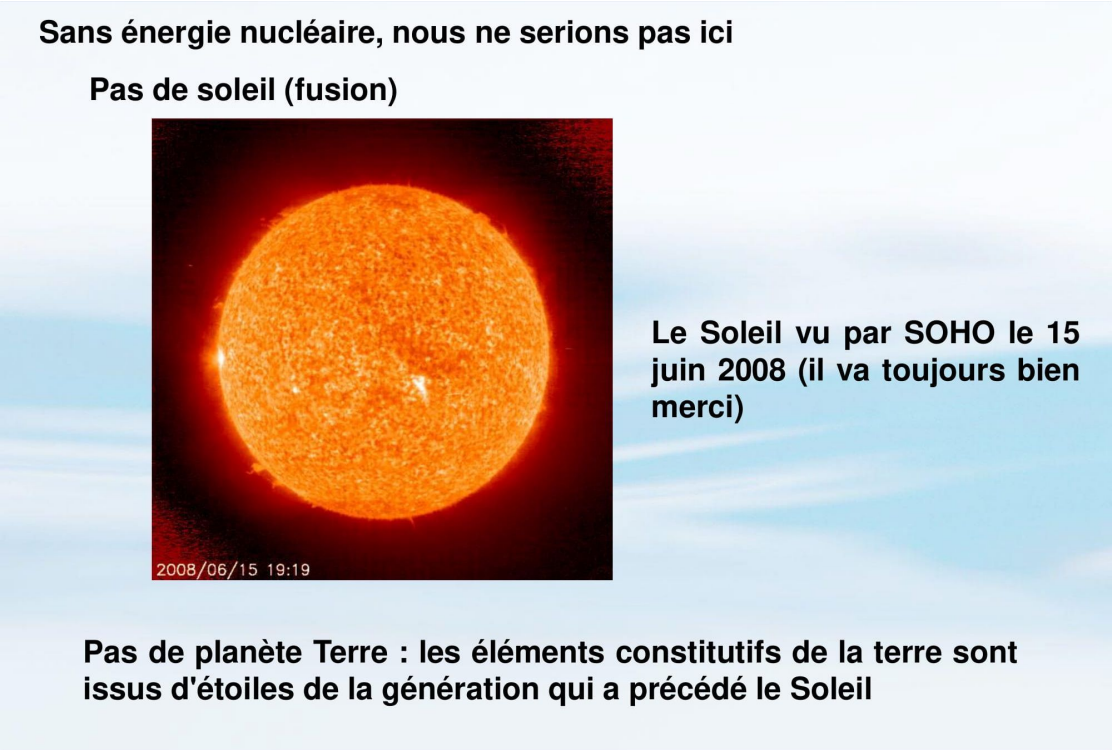
Quelque chose qui est important, c'est de savoir qu'il y a un énorme facteur multiplicateur entre l'énergie chimique, c'est-à-dire l'énergie du réarrangement des électrons que vous pouvez avoir avec un atome, et l'énergie nucléaire, c'est-à-dire l'énergie du réarrangement des nucléons. L'ordre de grandeur entre les deux, qu'il faut garder en tête, est de l'ordre du million.

Donc, dit autrement, vous avez un million de fois plus d'énergie dans la fission d'un gramme d'uranium que dans la combustion d'un gramme de pétrole. Je vous le dis encore autrement : fissionner un gramme d'uranium libère la même quantité d'énergie thermique que de brûler une tonne de pétrole.

La raison à cela, c'est que l'énergie typique de réarrangement d'une couche électronique est de quelques électronvolts ; l'énergie typique d'une réaction de fission est de quelques centaines de millions d'électronvolts, dont vous perdez une partie au passage mais peu importe. Donc la raison pour laquelle l'énergie nucléaire est très concentrée, c'est lié à ça, c'est lié au fait que l'énergie de

réarrangement des noyaux dans un atome est quelque chose de beaucoup plus intense que l'énergie de réarrangement des électrons.

4. Le nucléaire, c'est d'abord la vie…



Diapositive 5.

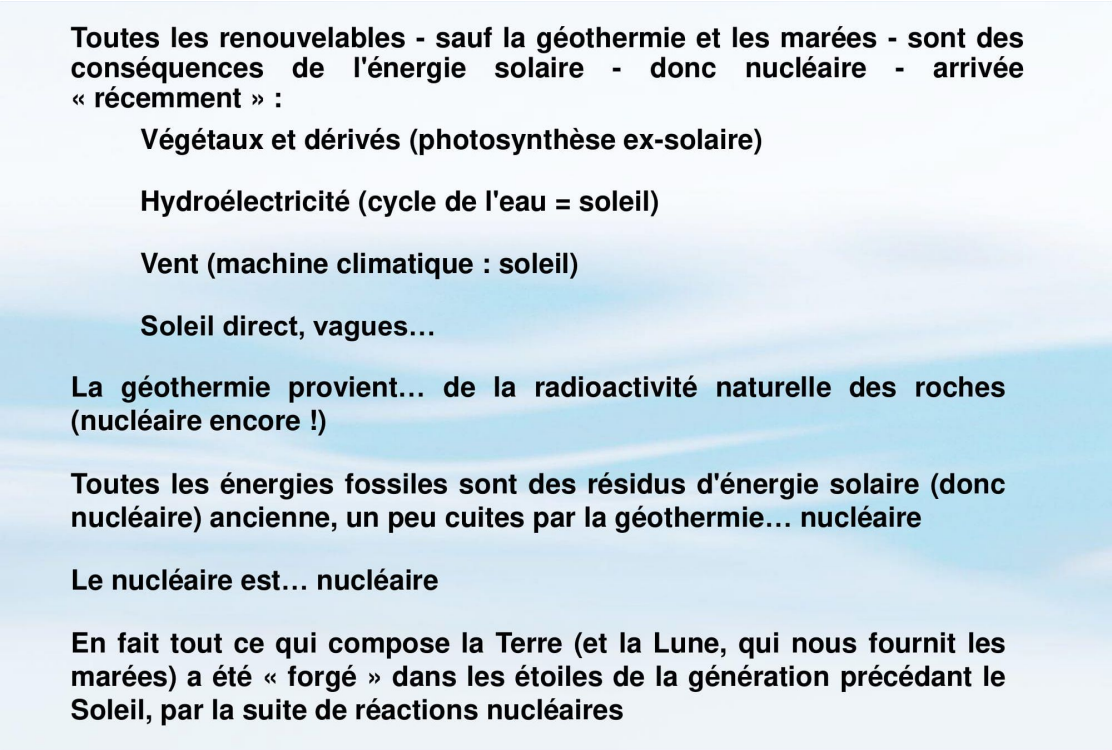
On a, soit dit en passant, une grosse bombe thermonucléaire permanente dans notre environnement, qui nous rend bien service et qui s'appelle le Soleil. Donc le Soleil, c'est un endroit où vous avez de la fusion en permanence, c'est assez gros. Ce qu'il faut savoir, c'est qu'en fait, toutes les énergies que nous utilisons sur Terre sont des dérivées directes ou indirectes de l'énergie nucléaire :

— Le rayonnement solaire à l'évidence dérivé de l'énergie nucléaire.

— Toutes les énergies fossiles sont des énergies dérivées de la photosynthèse, donc indirectement dérivées du rayonnement solaire, donc de l'énergie nucléaire, etc.

Donc, en gros, sans énergie nucléaire, nous ne sommes pas sur Terre. Et toutes les énergies que nous utilisons sont des dérivées plus ou moins directes de l'énergie nucléaire.

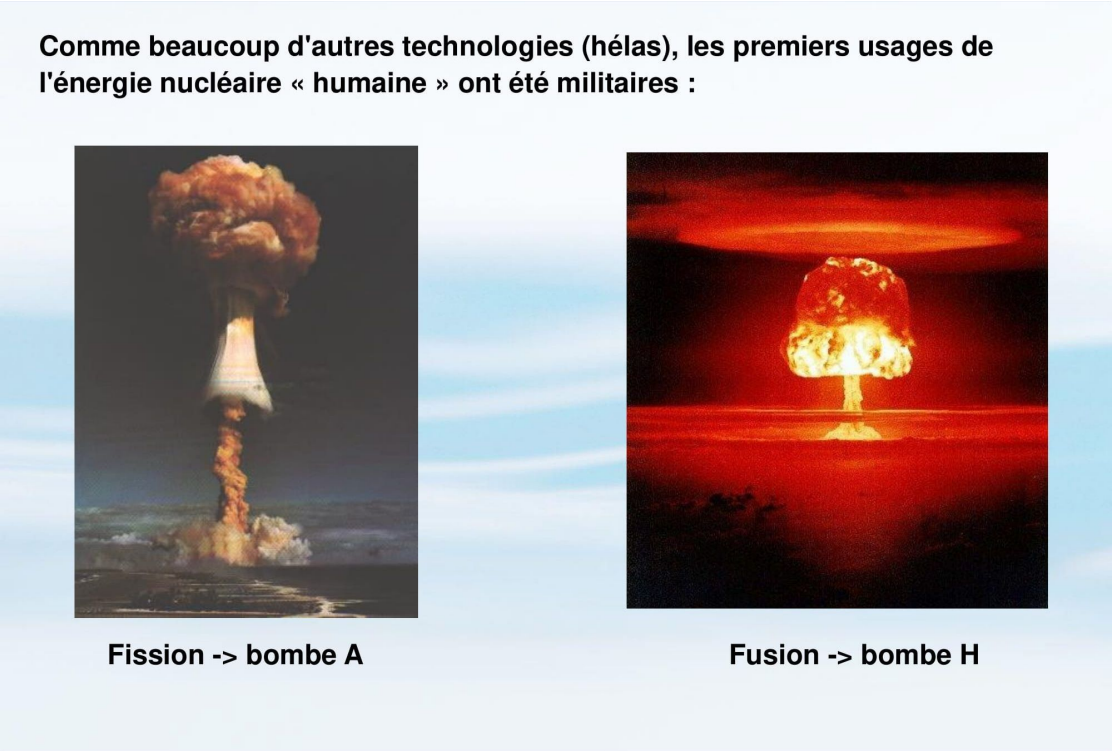
5. Le nucléaire est la base de toute notre énergie…



Diapositive 6.

Le vent, c'est pareil, etc. Donc un truc qui est intéressant à avoir en tête (c'est amusant) : l'énergie nucléaire est à l'origine, encore une fois, d'à peu près toutes les sources d'énergie qu'on utilise sur Terre.

6. D’abord se taper dessus, ensuite penser à autre chose



Diapositive 7.

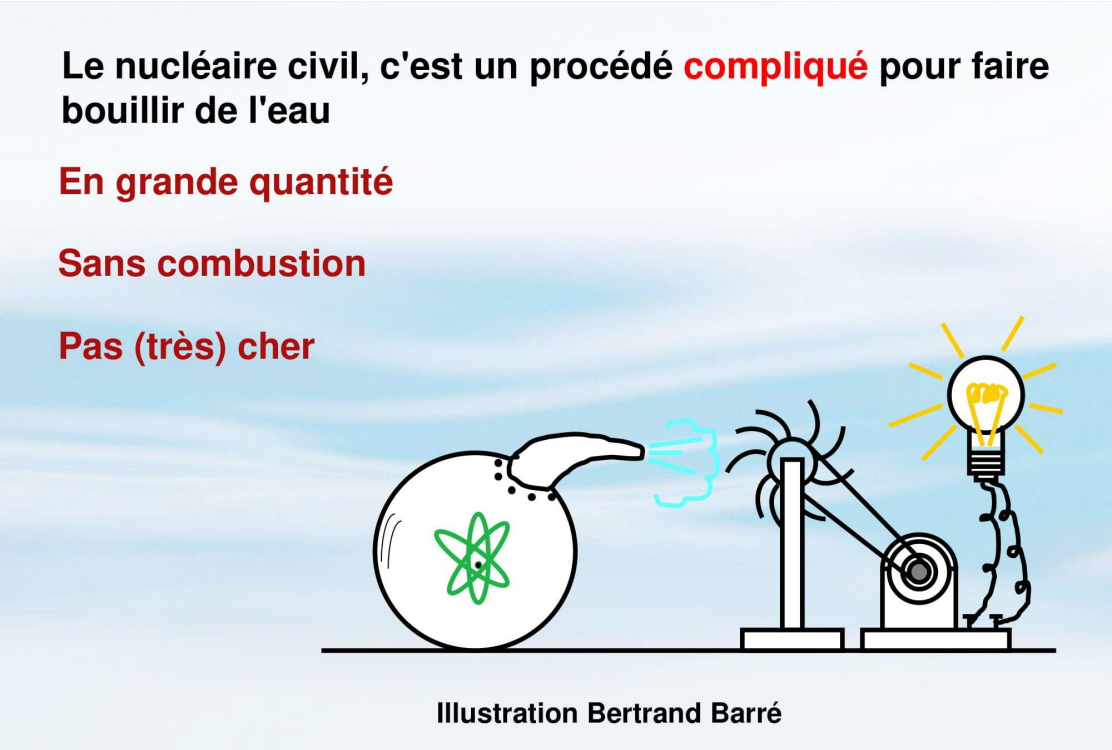
Le nucléaire a une particularité qui n’en est pas une, c’est que, comme vous le savez probablement, il a démarré son existence sur Terre sous forme militaire.

Alors, en fait, ce n’est pas tout à fait vrai, parce qu’avant de faire la bombe atomique, il a fallu faire la pile de Fermi qui, soit dit en passant, avait la puissance totalement ridicule d’un demi-watt. Avec la pile de Fermi, on peut faire des tout petits réacteurs nucléaires : la preuve c’est que la pile de Fermi faisait un demi-watt de puissance.

Mais après, les premières manifestations visibles ont été des manifestations militaires. Et du coup, c’est une partie de la mauvaise presse qui est liée au nucléaire. Cela étant, quand vous regardez un peu dans l’histoire des technologies mises au point par les Hommes, à peu près tout ce que l’on fait aujourd’hui à titre civil est malheureusement né – pas tout mais beaucoup de trucs sont nés – à cause de velléités militaires. C’est notamment le cas pour la robotique par

exemple, c'est le cas pour Internet, c'est le cas pour une bonne partie des engins à moteur, etc. On a d'abord cherché à en faire des usages militaires avant d'en faire des usages civils. Donc de ce point de vue, le nucléaire ne fait pas exception (je ne sais pas s'il faut dire heureusement ou malheureusement).

7. Si on reste pacifique, c'est quoi l'idée de départ ?

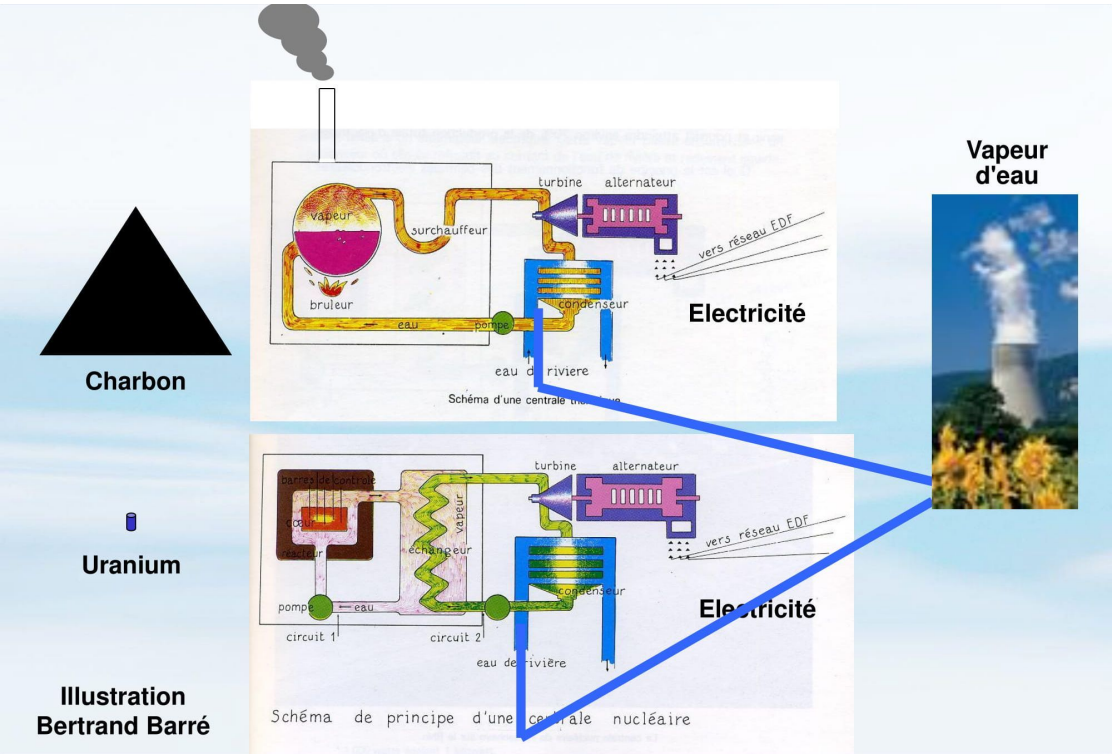


Diapositive 8.

Quand on s'intéresse à la production électrique, le nucléaire, fondamentalement, c'est une manière de faire bouillir de l'eau : c'est fondamentalement ça. Donc une centrale nucléaire, c'est fondamentalement une bouilloire compliquée, c'est ça aujourd'hui. C'est quelque chose qui permet de faire bouillir de l'eau en grande quantité, sans utiliser d'oxydation du carbone, c'est-à-dire sans combustion, et on va le voir – nonobstant ce qui peut être dit ici et là – pour pas très cher.

On n'aura pas le temps aujourd'hui de disserter de façon approfondie sur tous ces aspects et, même si j'avais eu l'horaire normal, malheureusement je n'aurais pas eu le temps parce que ce sont des débats techniques et compliqués. Mais en gros, c'est ça l'idée : c'est une grande quantité d'énergie, pas de combustion et pas très cher.

8. Nucléaire ou charbon, c'est – presque – pareil



Diapositive 9.

La différence entre une centrale nucléaire et une centrale à charbon ou une autre centrale thermique, elle est donc dans la manière de produire la chaleur :

— En ce qui concerne une centrale à charbon, on fait brûler du charbon.

— En ce qui concerne une centrale nucléaire, on fait fissionner des atomes.

Tout ce qui se passe derrière est identique, c'est-à-dire que dans un cas comme dans l'autre, ça va vous dégager des grandes quantités de chaleur. Avec ces grandes quantités de chaleur, vous allez créer de la vapeur, et avec cette vapeur vous allez faire tourner une turbine – donc un truc avec des ailettes – et il se passe la même chose que dans l'alternateur de votre voiture, c'est-à-dire qu'une fois que vous avez mis un rotor en rotation dans un champ magnétique, eh bien ça vous sort du courant.

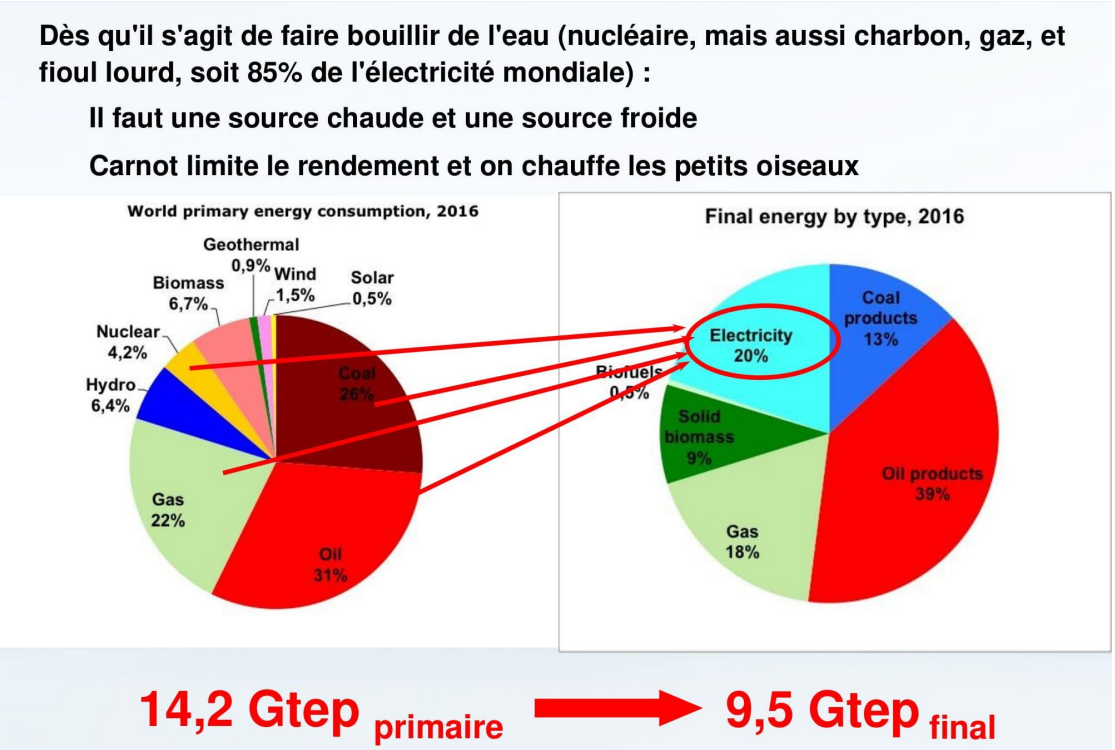
Vous pouvez avoir dans les deux cas de figure, ou pas, ce qu'on appelle un aéroréfrigérant : c'est-à-dire cette grande tour que vous voyez, vous savez, c'est l'image d'Epinal de la centrale nucléaire à la télévision, cette grande tour qui

fume. Alors en fait, cette grande tour qui fume n'est rien d'autre qu'une tour de refroidissement. C'est donc votre source froide de votre machine de Carnot. Et cette tour de refroidissement, vous en avez besoin que vous ayez du nucléaire ou que vous ayez du charbon, dès lors que vous êtes en bord de rivière et donc que vous avez besoin de la chaleur latente d'évaporation pour refroidir, parce que le débit de la rivière n'est pas suffisant pour refroidir simplement par conduction thermique.

Quand vous êtes en bord de mer, votre source froide permet d'aller perdre des calories dans la mer et vous n'avez pas besoin d'aéroréfrigérant. Donc quand vous regardez une centrale nucléaire française qui est située en bord de mer, Gravelines ou Penly ou Blayais, eh bien vous n'avez pas d'aéroréfrigérant. Par contre, quand vous avez une centrale à charbon en bord de rivière, vous avez une tour de refroidissement comme celle-là.

Donc la tour de refroidissement n'est pas l'apanage du nucléaire, c'est l'apanage de la centrale thermique en bord de rivière.

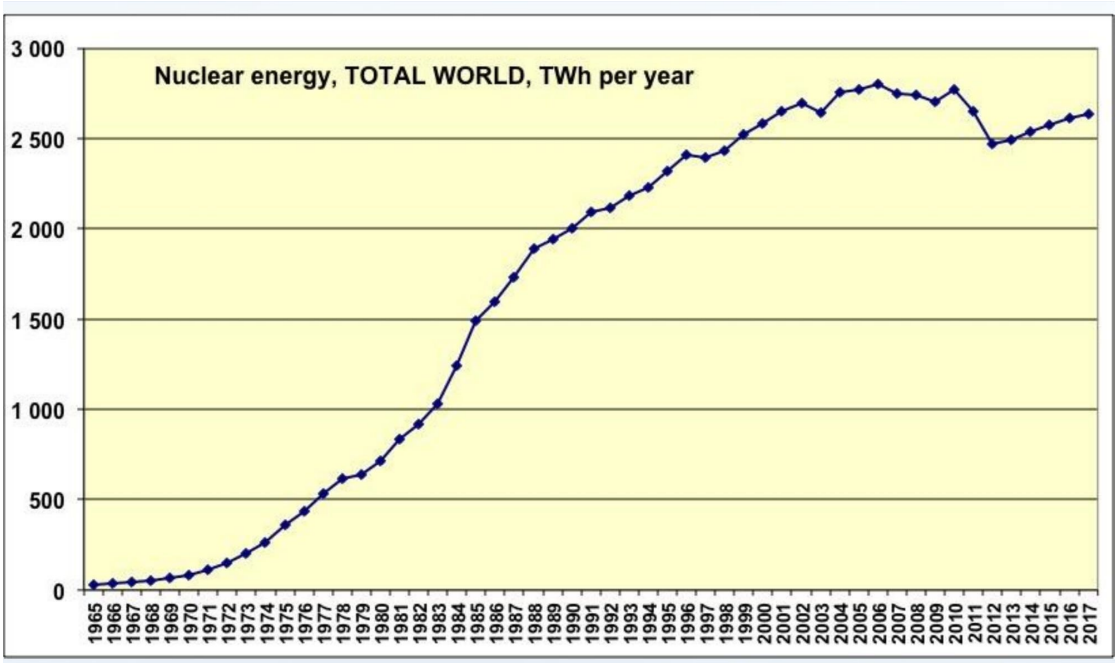
9. Le nucléaire, vraiment trop mauvais ?



Diapositive 10.

Le nucléaire, c'est une manière de produire de l'électricité, donc c'est quelque chose que vous voyez apparaître dans les énergies finales, dans l'électricité. C'est aujourd'hui, un peu moins de 15% de l'électricité mondiale. C'est une part qui a plutôt tendance à baisser un peu, parce que le nucléaire, en gros, est plutôt une énergie, aujourd'hui, qui n'a pas beaucoup la cote par rapport à d'autres.

10. L'atome, une affaire récente



Électricité d'origine nucléaire dans le monde depuis 1965, en TWh.
Source : BP Statistical review, 2018

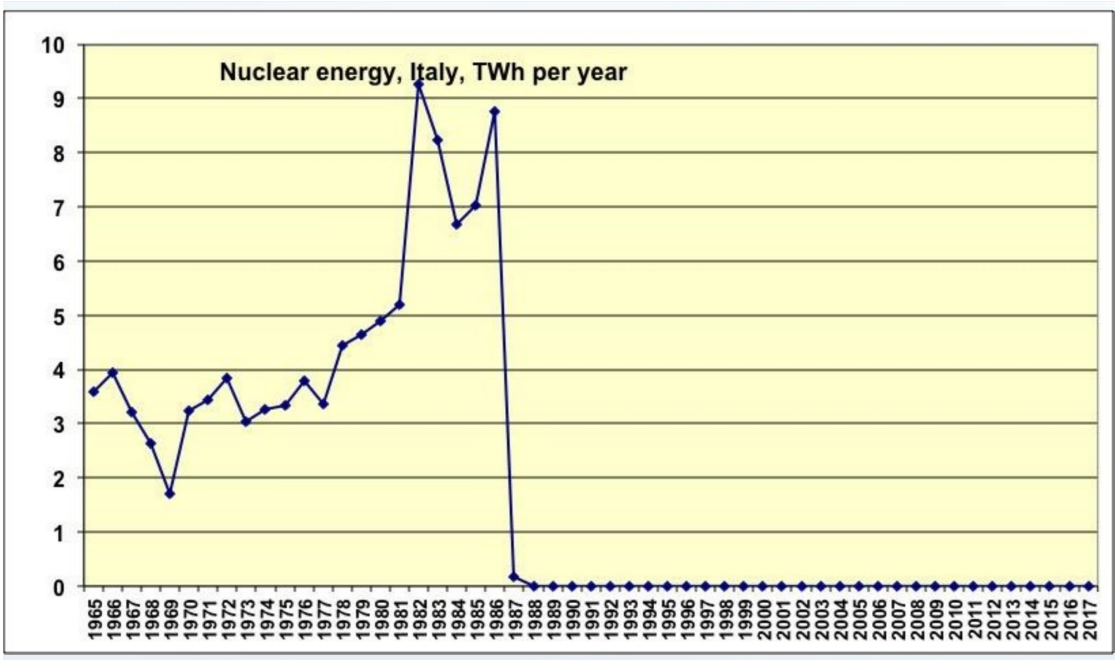
Diapositive 11.

Alors si je regarde combien on produit d'énergie nucléaire dans le monde, vous voyez ici la production depuis 1965 dans le monde : c'est une énergie qui est très récente, encore une fois la pile de Fermi c'est 1942, donc avant 1942 il n'y en avait pas beaucoup.

Vous voyez que c'est quelque chose qui s'est fortement accéléré après les chocs pétroliers, qui a fortement ralenti au moment des contre-chocs dans les années 80, qui s'est beaucoup calmé après le début des années 2000 on va dire, à un moment où, soit dit en passant, le pétrole n'était pas très cher. Ici vous voyez la conséquence à la fois de la crise de 2009 et de Fukushima, et puis depuis, ça recommence à monter gentiment. On verra que les Japonais redémarrent des réacteurs les uns derrière les autres.

Alors là, vous avez une image un peu globale en ce qui concerne le nucléaire.

11. Certains se sont déjà arrêtés (pour le moment)



Électricité d'origine nucléaire en Italie depuis 1965, en TWh.
Source BP Statistical review, 2018

Diapositive 12.

Après, vous pouvez avoir des images qui sont extrêmement discriminées par pays. Alors ici, vous avez ici l'exemple de l'Italie. Comme vous le voyez, l'Italie a un réacteur nucléaire en fonctionnement. Alors, pardon, la puissance typique d'un réacteur nucléaire c'est entre un demi-gigawatt et un gigawatt. L'EPR c'est un très gros réacteur qui fait un gigawatt et demi, mais c'est entre un demi et un gigawatt.

— Est-ce que vous savez combien il y a d'heures dans l'année ?

— 8760.

— Donc si vous prenez un gigawatt et que ça fonctionne à puissance maximale toute l'année, à la fin de l'année, vous avez quelle production électrique ?

— 8760 gigawattheures.

Si on traduit ça en térawattheures, ça fait 8,8 en gros.

Alors comme une centrale nucléaire, ça ne fonctionne pas tout le temps, parce que de temps en temps il faut l'arrêter pour recharger, etc., pour faire des trucs et des machins. Et puis de temps en temps, ça ne fonctionne pas à pleine puissance dans certains pays. En France, ça ne fonctionne pas tout le temps à pleine puissance, dans la quasi-totalité des autres pays, si.

En gros, retenez qu'une centrale nucléaire de 1 gigawatt, dans l'année, elle va vous produire de 6 à 8 térawattheures.

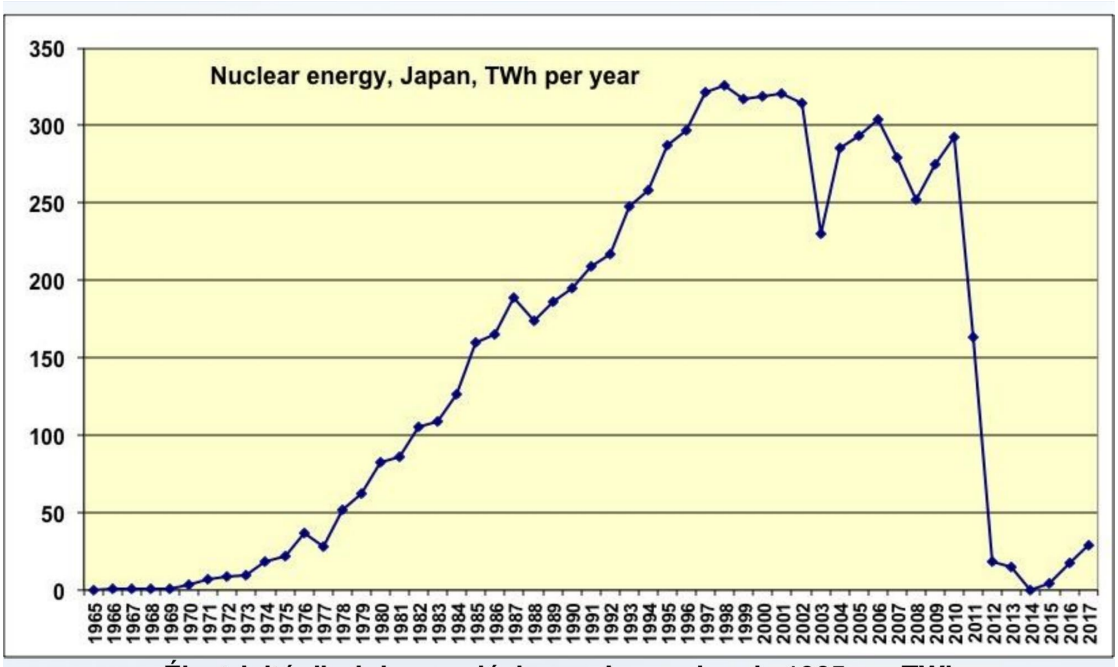
Donc, ça vous donne une règle simple : une fois que vous voyez sur les graphiques la quantité de térawattheures produite dans l'année, là vous voyez qu'il y en a 4 d'abord et 8 ensuite, donc ça, ça vous dit : l'Italie avait d'abord un réacteur d'un gigawatt, ou deux d'un demi gigawatt je ne sais pas, puis ensuite elle a doublé ça, c'est ça que ça veut dire.

*** Question auditoire ***
« Est-ce qu'il y a un seul réacteur dans une centrale ? Quelle est la moyenne ? »
Une centrale peut avoir plusieurs réacteurs. En France, c'est 3-4, la plus grosse c'est Gravelines qui doit en avoir 5 ou 6 je ne sais plus, et vous pouvez descendre à 2. Mais en général vous en avez plusieurs sur un site.

Donc là, vous voyez, l'Italie a un réacteur en fonctionnement, elle en met un deuxième en fonctionnement, et puis là, qu'est-ce qu'il se passe ?

Tchernobyl, référendum en Italie, décision de sortie du nucléaire et crac, « over night », il n'y a plus rien.

12. D’autres ont mis la centrale sur la mauvaise plage

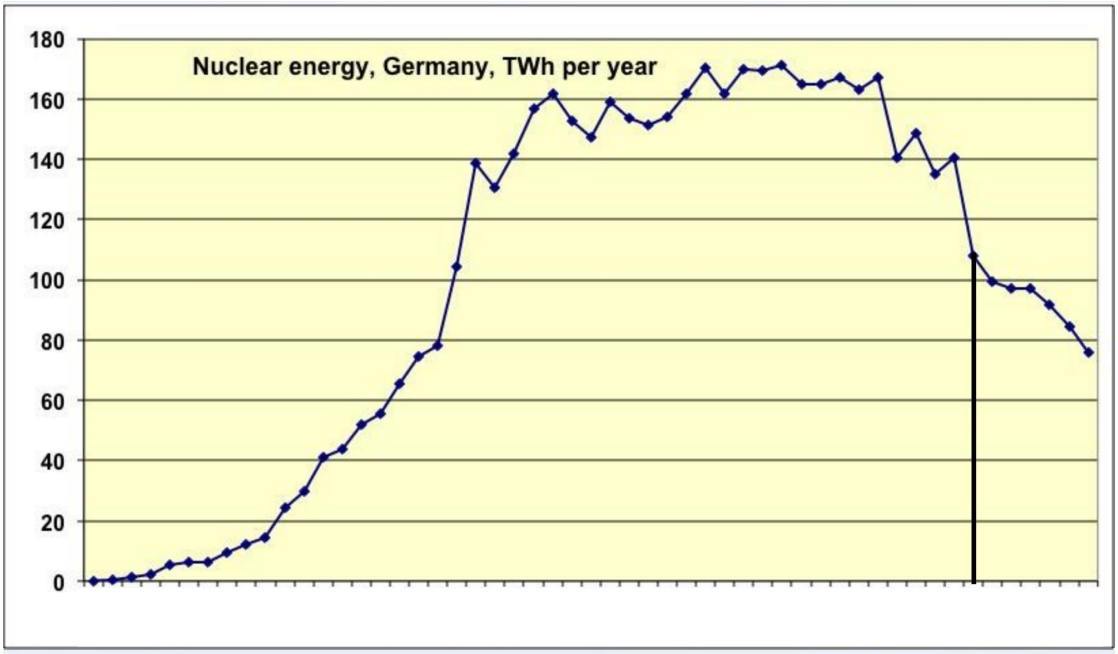


Électricité d'origine nucléaire au Japon depuis 1965, en TWh.
Source BP Statistical review, 2018

Diapositive 13.

Ici vous avez un autre pays bien connu, c’est le Japon. Donc vous voyez, le Japon a une production qui augmente, qui est quasi-stable avec de temps en temps, des fermetures. Là vous avez Fukushima, et puis ils ont commencé à en redémarrer. Ils en ont redémarré 8 ou 10, je ne sais plus.

13. D’autres ont peu de plages mais quelques électeurs

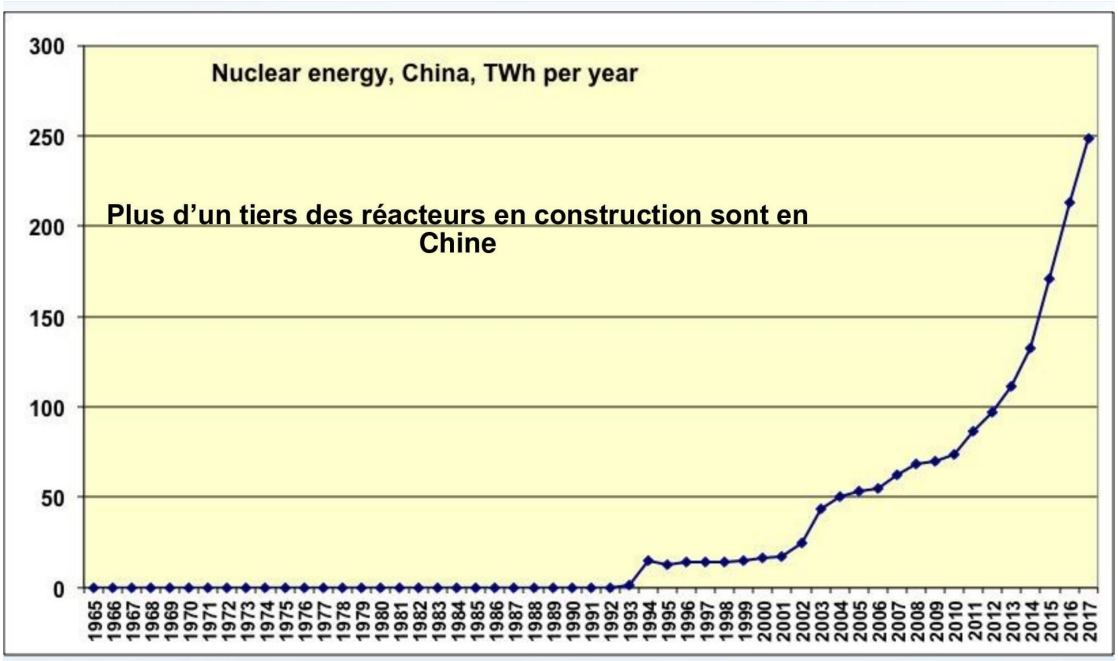


Électricité d'origine nucléaire en Allemagne depuis 1965, en TWh.
Source BP Statistical review, 2018

Diapositive 14.

Ici vous avez l’Allemagne. Alors l’Allemagne, j’ai volontairement masqué les abscisses, il n’y a pas les abscisses là, et vous savez que l’Allemagne a décidé de sortir du nucléaire. Alors question : est-ce que vous pouvez me dire à quoi correspond cette année-là ? Alors, une première suggestion, c’est Tchernobyl. Deuxième suggestion, c’est Fukushima. Eh bien la réponse : c’est ni l’un ni l’autre. C’est le début du plan Schröder. Fukushima c’est là. Donc en fait ce qu’il faut savoir, c’est qu’au moment où l’Allemagne accélère, on va dire, sa sortie du nucléaire, au moment de Fukushima, en fait elle ne fait qu’entériner un truc qui a démarré des années avant, au début des années 2000, et qui est un truc que Merkel avait essayé d’arrêter juste avant Fukushima. Et puis avec Fukushima, elle a dit : « C’est bon, on plie. »

14. D’autres mettent le paquet



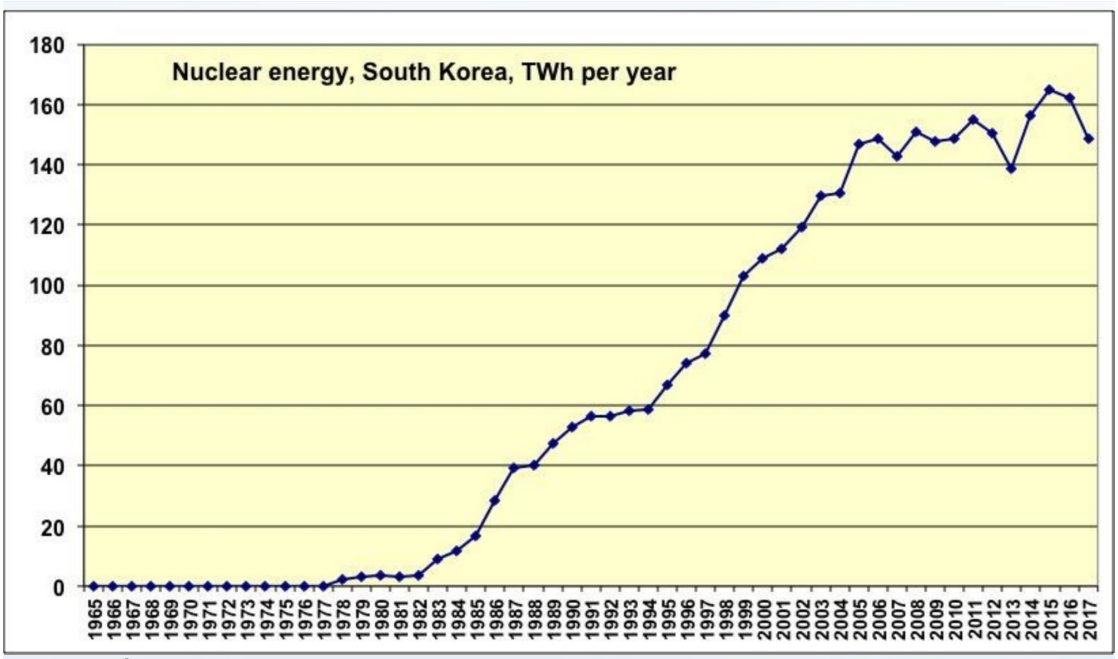
Électricité d'origine nucléaire en Chine depuis 1965, en TWh.

BP Statistical review, 2018

Diapositive 15.

Alors ici vous avez un pays qui, pour le moment, n’a pas vraiment décidé d’arrêter et qui est la Chine, qui doit concentrer aujourd’hui, de mémoire, pas loin de la moitié des réacteurs en construction dans le monde et qui, comme vous le savez probablement, a démarré un puis deux EPR ; le deuxième venant d’entrer en service il y a quelques semaines.

15. D’autres mettent le paquet (bis)

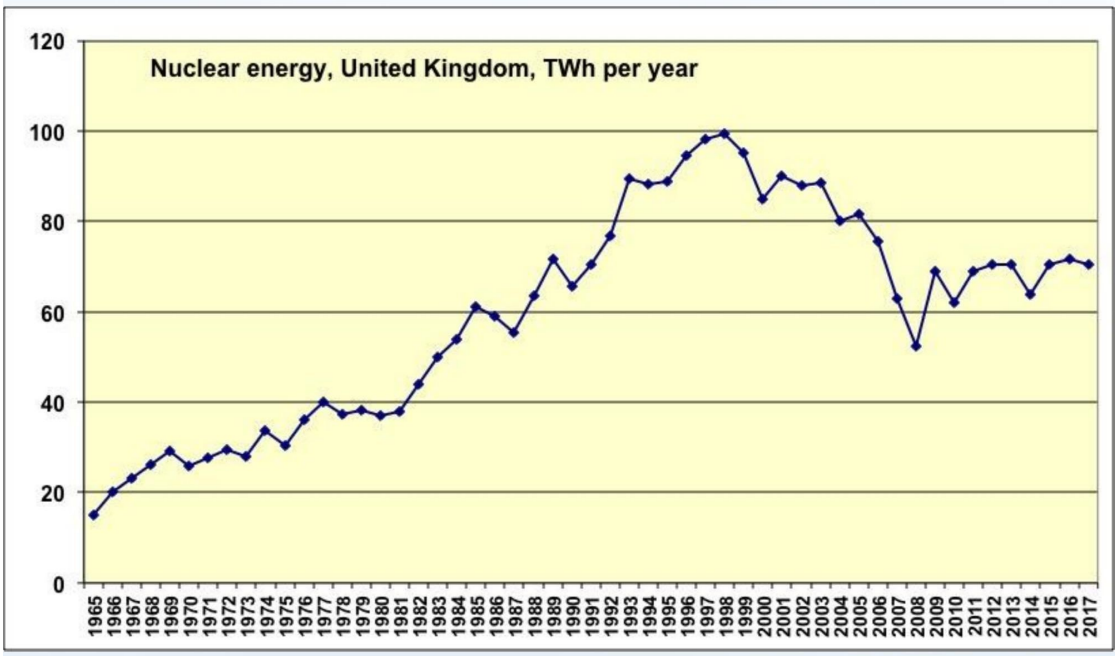


Électricité d'origine nucléaire en Corée su Sud depuis 1965, en TWh.
BP Statistical review, 2018

Diapositive 16.

Ici, vous avez la Corée du Sud qui a une fraction assez significative de son électricité qui provient du nucléaire – alors qui, aussi récemment, s’est tâtée en disant « Est-ce que je sors, est-ce que je ne sors pas ? »

16. D'autres voudraient bien, mais ne peuvent point



Électricité d'origine nucléaire en Grande Gretagne depuis 1965, en TWh.
BP Statistical review, 2018

Diapositive 17.

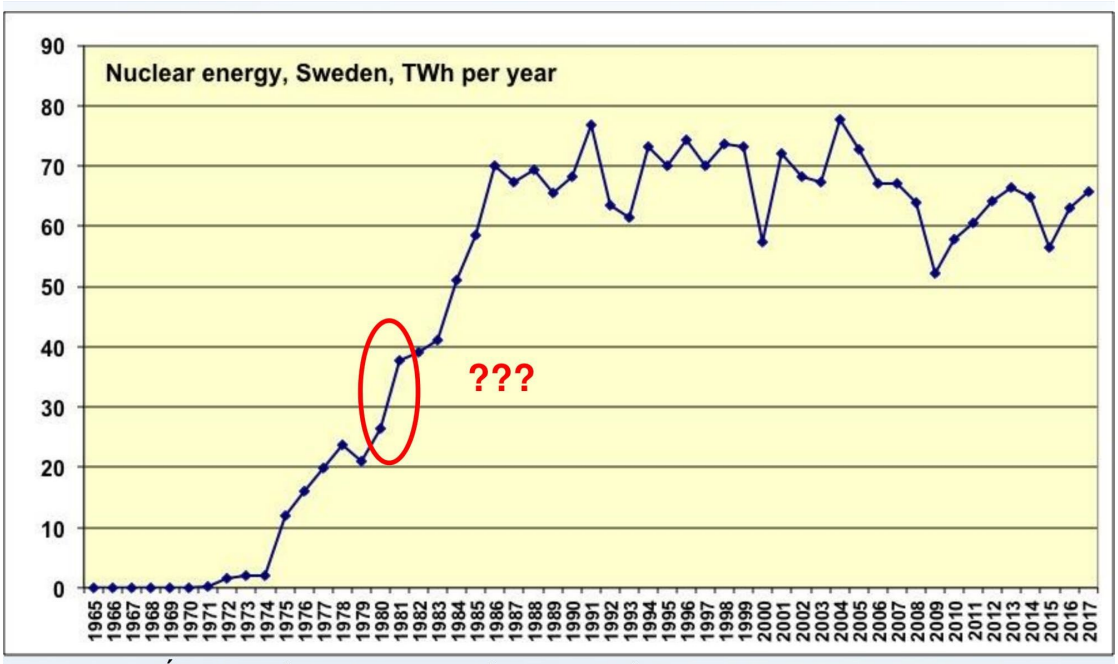
Ici vous avez le Royaume-Uni. Alors, le Royaume-Uni est un exemple intéressant de pays qui a très envie d'avoir du nucléaire et qui en a globalement actuellement plutôt de moins en moins par défaut d'investissement : vous savez probablement que le Royaume-Uni est un pays dit assez libéral, c'est-à-dire qu'on compte beaucoup sur le privé pour faire des choses. Et ce qu'on verra un peu plus tard, c'est que le nucléaire, par opposition au charbon et au gaz, a la particularité d'avoir une structure économique dans laquelle il faut payer à peu près tout avant de démarrer la centrale.

Vous avez une énorme part d'investissement initial, et ensuite la part relative des coûts de fonctionnement est très faible. Et quand vous êtes dans un contexte dans lequel il faut payer à peu près tout avant de démarrer la centrale, c'est un contexte dans lequel, dans le monde du capital privé, ça a du mal à se faire. Dit autrement, le capital privé aime bien ne pas trop attendre pour voir le rendement de l'argent revenir en retour.

Donc, quand il faut mettre plein d'argent, construire 8 ans, éventuellement 10, éventuellement 12, avant de commencer à avoir un euro de chiffre d'affaires, ce sont des trucs que le privé n'aime pas du tout. Donc le fait, en Grande-Bretagne, d'avoir mis dans le domaine privé – comme dans beaucoup d'autres endroits en Europe, mais eux encore plus tôt que les autres – le système de production électrique, a conduit à un défaut d'investissement.

Il s'est passé exactement le même processus dans le train en Grande-Bretagne. Donc, en ce moment ils sont en train de faire machine arrière toute mais il n'empêche qu'on paie ce défaut d'investissement avec le fait que, le nucléaire – que les Grands-Bretons aiment bien, a vu sa part baisser.

17. D’autres ont dit qu’ils feraient sans, sauf que…



Électricité d'origine nucléaire en Suède depuis 1965, en TWh.
BP Statistical review, 2018

Diapositive 18.

Ici vous avez un pays qui a également un parc nucléaire significatif. Vous verrez même après qu’il a une singularité ce pays ; c’est la Suède. Donc la Suède a une production nucléaire conséquente et alors vous voyez, ici, c’est une année où les Suédois ont décidé de sortir du nucléaire : ils ont fait un référendum et puis, ils ont dit : « Tiens, on décide de sortir du nucléaire. »

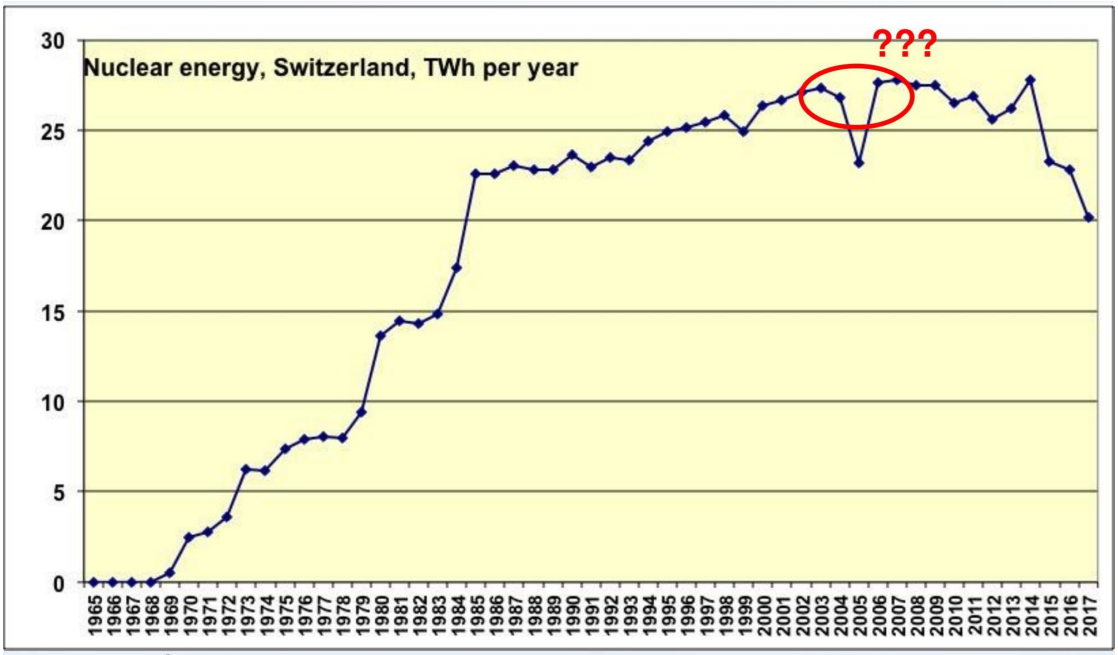
Ça vous fait rire, vous avez raison de rire.

En fait, la contrepartie de ce que j’ai dit sur le fait que le nucléaire était un système qui était très lent à s’installer, c’est que c’est aussi un système qui, une fois qu’il est en place – le nucléaire amorti étant un truc extrêmement peu cher ; là, pour le coup c’est vraiment très peu cher le nucléaire amorti –, s’en passer comme ça en disant : « on va s’en débarrasser et puis en fait on va le remplacer et ça ne va pas nous coûter cher », est malheureusement quelque chose de très difficile, enfin malheureusement ou heureusement je ne sais pas, mais c’est quelque chose de très difficile.

17. D'AUTRES ONT DIT QU'ILS FERAIENT SANS, SAUF QUE…

Et on verra qu'en fait, une fois qu'on a mis le doigt dans le nucléaire, ce n'est pas facile d'en sortir rapidement, ce qui n'est pas nécessairement quelque chose de très gênant, mais c'est une caractéristique qu'il faut avoir en tête.

18. D’autres ont dit qu’ils aimaient, et puis non, et oui, et non…



Électricité d'origine nucléaire en Suisse depuis 1965, en TWh.

BP Statistical review, 2018

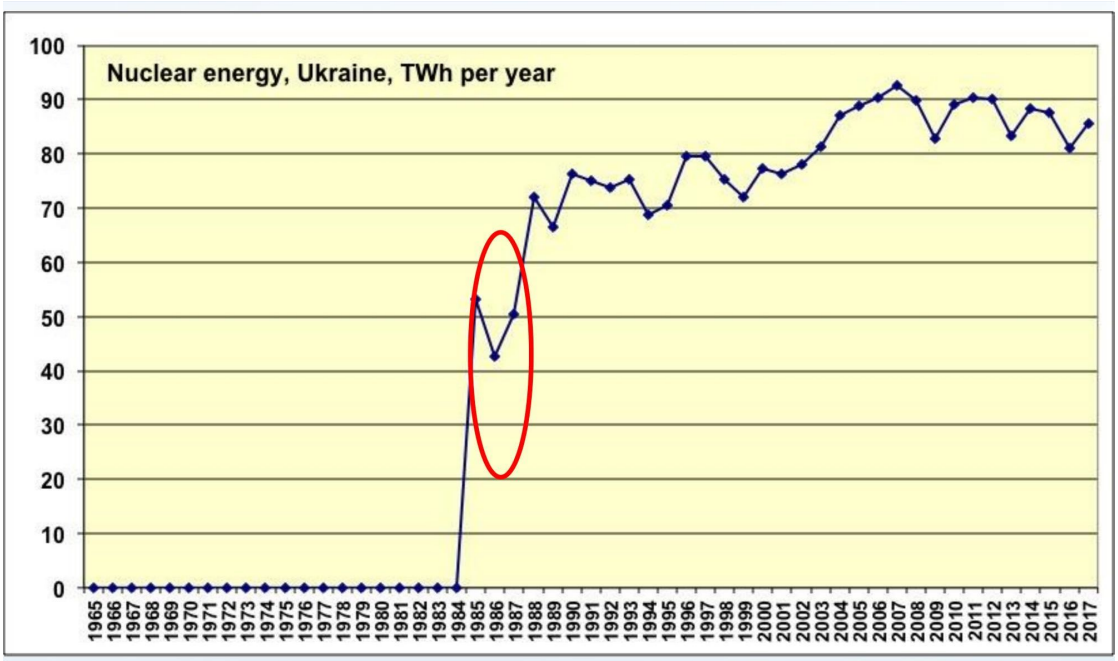
Diapositive 19.

Ici c’est pareil, vous avez la Suisse.

Alors la Suisse, cette année-là, elle fait un référendum dans l’autre sens. Alors les Suisses, c’est assez rigolo, ils font un pas en avant, un pas en arrière, donc là où j’ai cerclé en rouge, c’est une année où ils disent : « On se donne le droit. » Avant, il y avait un moratoire sur la construction de nouvelles centrales nucléaires, c’est-à-dire le cadre législatif en Suisse était de dire : « On s’interdit de construire de nouvelles centrales. »

Puis en 2003, ils votent en disant : « On s’autorise éventuellement à construire de nouvelles centrales si on veut. » Vous voyez le résultat sur la production, tout à fait nul, ils ont juste dit : « On en fait si on veut », mais ils n’ont rien fait. Puis récemment, ils ont voté dans l’autre sens en disant : « On décide d’en sortir. » Et d’ici à ce que je meure, il n’est pas complètement exclu qu’ils rechangent d’avis au moins une fois.

19. D'autres « explosent », puis « redémarrent »



Électricité d'origine nucléaire en Ukraine depuis 1985, en TWh.
BP Statistical review, 2018

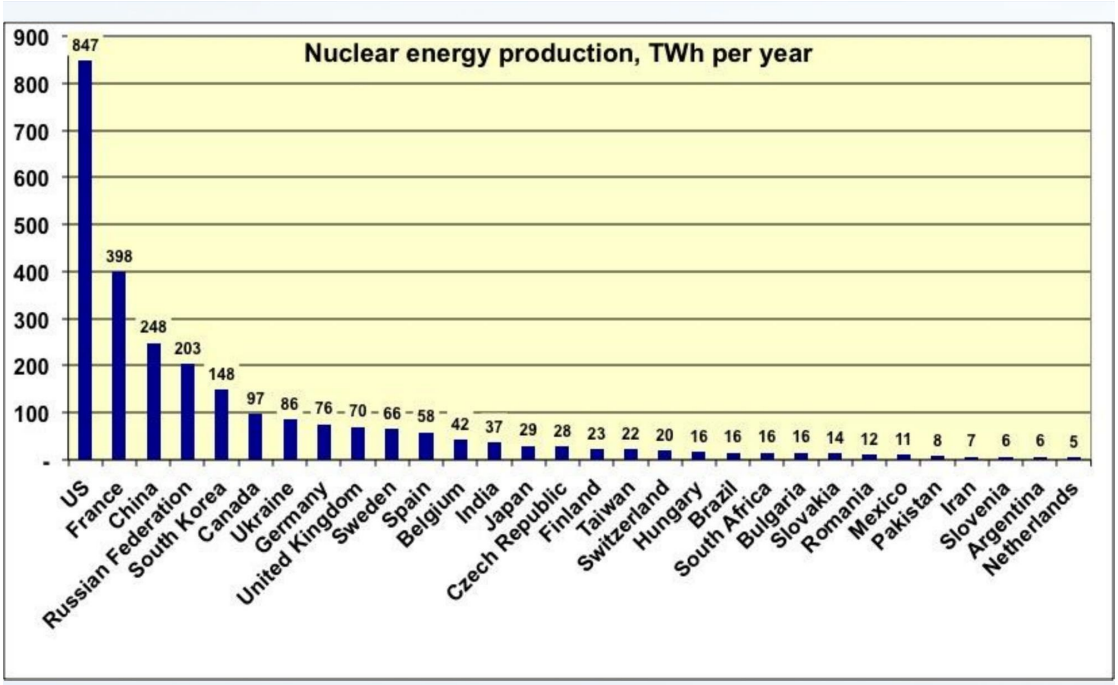
Diapositive 20.

Ici, vous avez l'Ukraine.

Alors l'Ukraine est un pays que vous connaissez un peu puisque c'est dans ce pays qu'on a eu Tchernobyl. Alors Tchernobyl est cerclé là. Donc ce que peu de gens savent, c'est qu'après Tchernobyl, l'Ukraine a doublé sa production nucléaire. C'est assez amusant, enfin je ne sais pas si Tchernobyl est amusant mais cette anecdote est assez amusante.

Voilà, donc là, c'était juste un rapide tour de piste pour vous montrer qu'en ce qui concerne le nucléaire on a des évolutions selon les pays qui sont contrastées et qui ne correspondent pas nécessairement à l'idée qu'on en a dans un sens comme dans l'autre.

20. Atome, qui en fait finalement ?



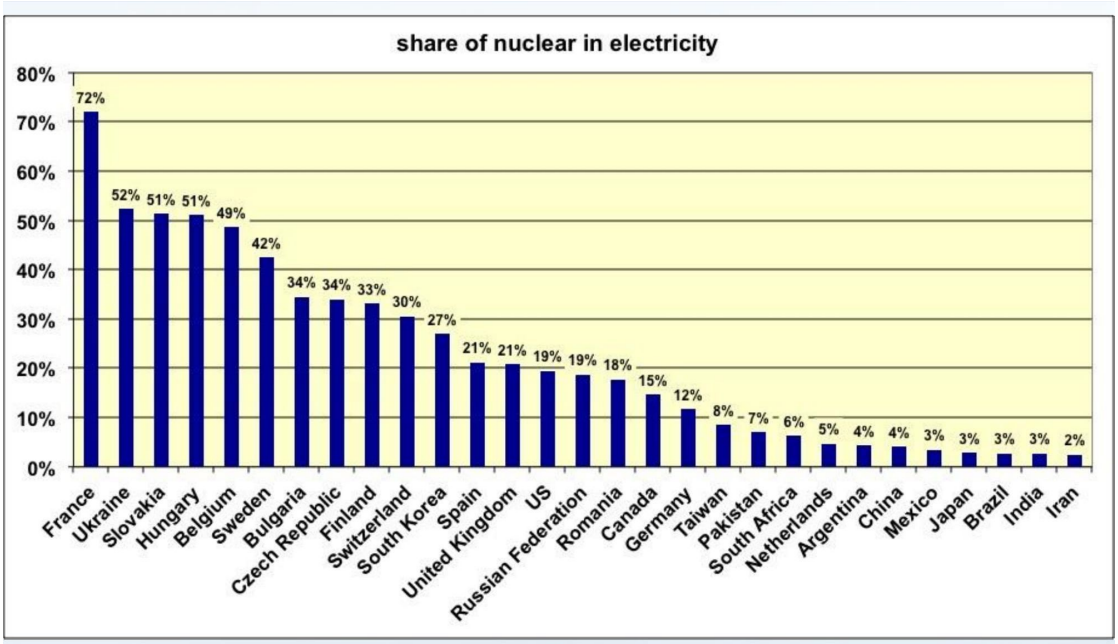
Production nucléaire en TWh en 2017. Source BP Statistical review, 2018

Diapositive 21.

Alors maintenant, on peut ranger les pays qui font du nucléaire de plusieurs manières.

La première manière qu'on peut avoir de les ranger, c'est de les ranger par production en valeur absolue. Donc là, ce que vous voyez, si on les range en valeur absolue, c'est que le premier pays au monde en production nucléaire ce sont les États-Unis, où le nucléaire représente à peu près 20% de la production électrique. Et ils ont une production en valeur absolue qui représente à peu près le double de la production française, un peu plus même. Ils ont une centaine de réacteurs en activité dans ce pays.

21. Atome, qui en fait beaucoup en proportion ?



% de nucléaire dans la production électrique en 2017

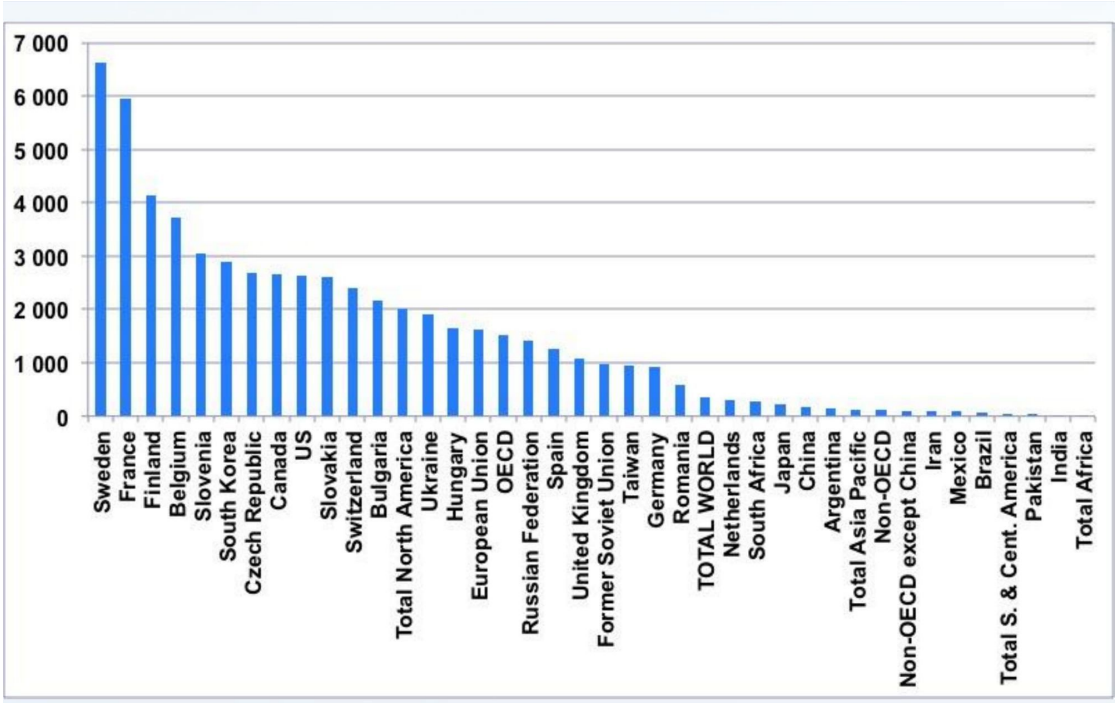
BP Statistical review, 2018

Diapositive 22.

Après, on peut ranger par part dans la production électrique.

Alors à ce moment, vous voyez qu'effectivement la France arrive en tête, enfin vous avez quelques pays qui arrivent juste derrière avec la production nucléaire qui représente une grosse moitié de la production électrique. Donc ils ne sont pas à 75-70 % mais ils sont quand même à 50%.

22. Atome, qui en fait beaucoup en proportion ? (bis)



kWh nucléaires par personne en 2017. BP Statistical review, 2018

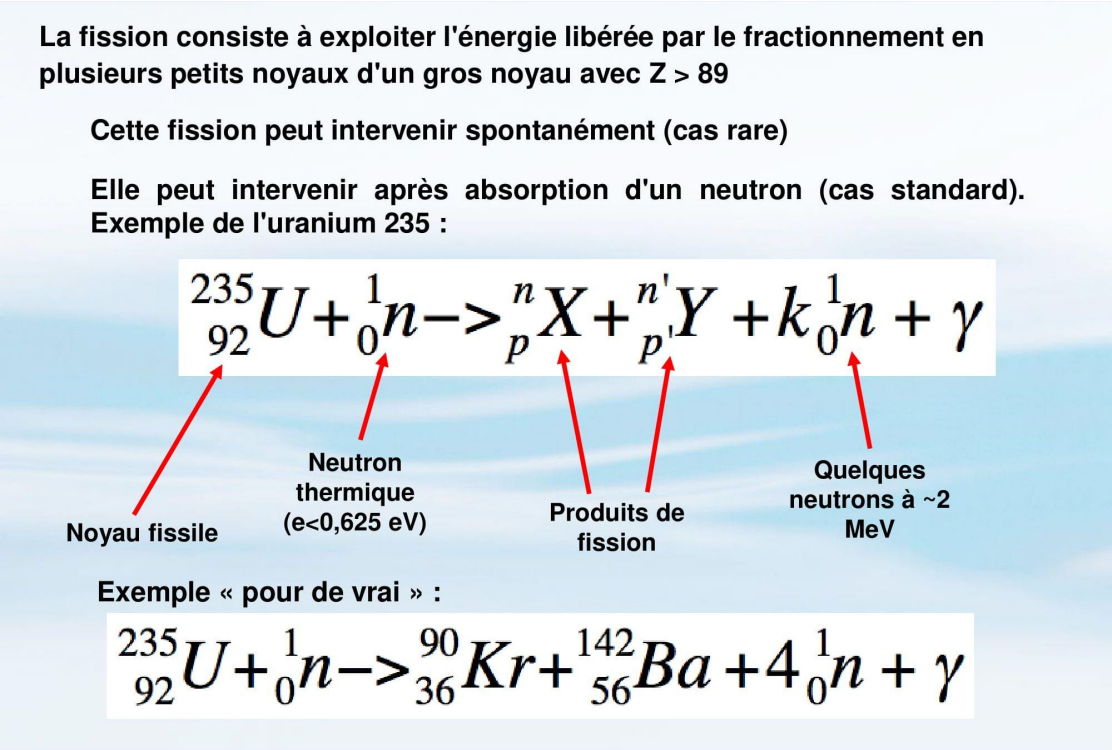
Diapositive 23.

Après, on peut les ranger encore d'une autre manière – et alors là, je pense que vous allez découvrir un truc que vous ne saviez pas – c'est en production en valeur absolue par personne, c'est-à-dire la quantité de kilowattheures nucléaires utilisée par personne et par an dans un pays.

Et là ce que vous voyez, c'est que le pays qui arrive en tête du classement, ce n'est pas du tout la France, c'est la Suède. Donc la Suède est le pays au monde qui a la plus grosse capacité installée par personne en nucléaire, et la plus grosse production annuelle par personne en nucléaire.

∗∗∗ Question auditoire ∗∗∗
« Cela veut juste dire que c'est eux qui utilisent proportionnellement par personnes le plus d'électricité ? »
Oui, ça veut aussi dire qu'ils ont des consommations électriques par personne très élevées, absolument. Ils sont un peu après la Norvège, qui, de mémoire, a une consommation électrique par personne qui est le triple de celle de la France, et les Suédois se baladent quelque part entre le double et le triple.

23. La fission : smaller is beautiful



Diapositive 24.

Alors maintenant, on va rentrer un peu plus dans le détail.

La fission, comme je vous le disais, c'est une manière d'exploiter le fait que, quand vous cassez un très gros noyau en deux, ça va vous libérer de l'énergie. Alors en pratique, il y a deux premières choses à savoir, c'est que la fission n'est possible qu'avec des noyaux qui ont un numéro atomique supérieur à 89 et par ailleurs uniquement avec des isotopes impairs. Donc par exemple, l'uranium 238 ne fissionne pas, l'uranium 235 oui, le plutonium 239 fissionne, le plutonium 240 ne fissionne pas, etc.

Donc les isotopes pairs ne fissionnent pas.

Alors dans la majeure partie des cas, cette fission, il faut la provoquer, elle est assez rare. Et donc, l'équation générale d'une fission, c'est ça. Vous avez un noyau d'uranium qui capture un neutron, ça lui donne une indigestion et il va éclater en 2 gros morceaux, X et Y, et plusieurs très petits, quelques neutrons et du rayonnement gamma. Donc ici, vous avez votre noyau fissile de départ, là

vous avez le neutron qu'il est capable d'absorber. Alors après, tous les noyaux fissiles ne sont pas capables de fissionner avec tous les types de neutrons.

Vous avez deux catégories de neutrons dans un réacteur nucléaire :

— Vous avez les neutrons qu'on appelle « rapides » : les *neutrons rapides* sont des neutrons à haute énergie produits par la fission. Donc, au moment de la fission, les neutrons rapides éjectés ont une énergie de quelques millions d'électronvolts. Et ces neutrons à quelques millions d'électronvolts peuvent être absorbés par certains atomes fissiles quand ils passent à proximité. Donc vous avez le « Roger Federer » de la capture de neutron, qui, quelle que soit la vitesse, il l'attrape, et puis vous avez moi, c'est-à-dire que si ça passe trop vite à ma portée, je ne sais rien en faire, il faut que ça aille lentement pour que je sois capable d'aller le chercher.

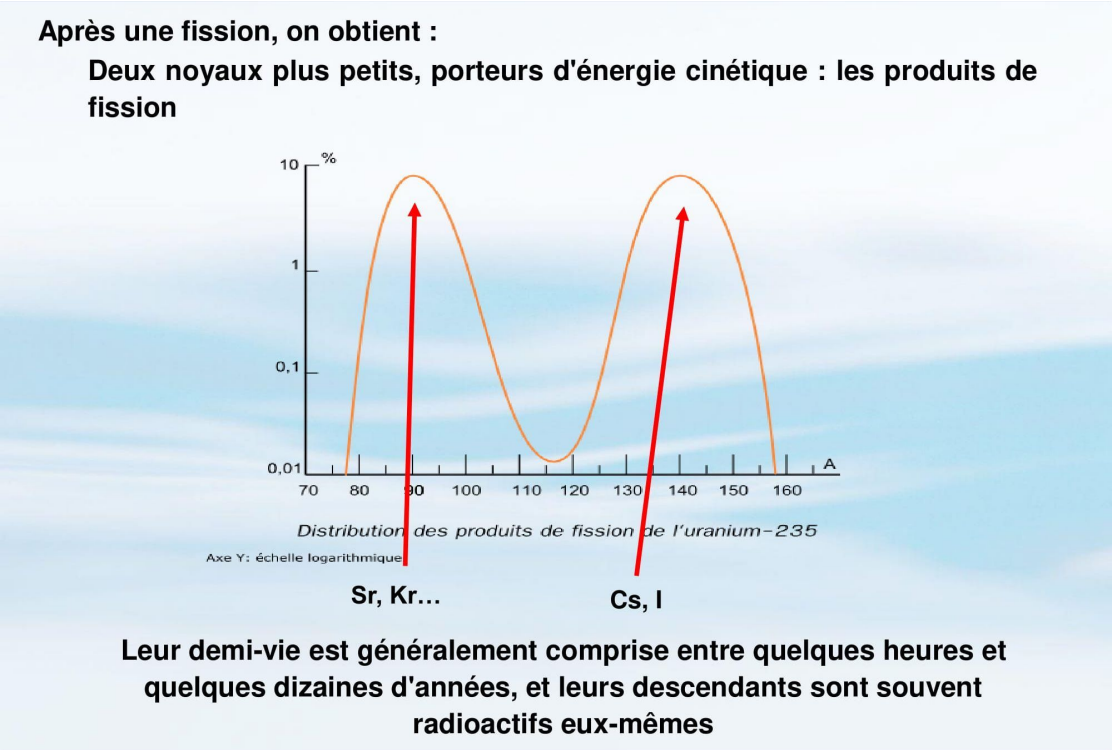
— Et ces neutrons qui passent lentement, on les appelle des *neutrons thermiques*, ça veut dire qu'ils ont une énergie cinétique de l'ordre de l'électronvolt, beaucoup moins que le million d'électronvolts qu'ils ont au moment où ils ont été créés.

Vous avez donc la création de ce qu'on appelle des produits de fission. Donc les produits de fission sont constitués :

1. des deux noyaux issus de la fission de l'uranium ;
2. de neutrons (de 1 à 4) ;
3. de rayonnement gamma.

Alors voilà un exemple : là vous avez un noyau d'uranium qui fissionne et qui vous fait un noyau de krypton, qui soit dit en passant est gazeux. Donc, dans les produits de fission, vous avez des produits gazeux, qui, parce que chimiquement ils ne s'associent à rien, vont vouloir sortir du cœur. Vous avez du baryum et puis ici, vous avez 4 neutrons et du rayonnement gamma. Donc voilà, *l'équation générale de la fission, ça ressemble toujours à ça*.

24. La fission, c'est le grand bazar…



Diapositive 25.

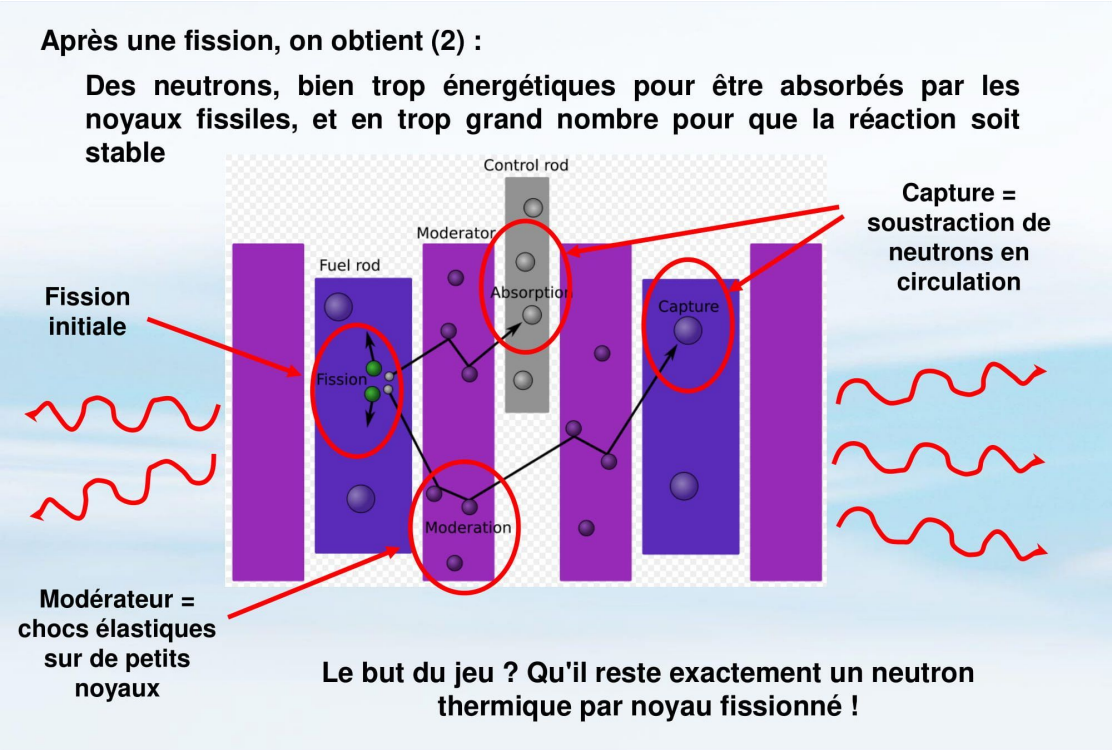
Concernant les produits de fission, la nature a décidé de faire un peu de biodiversité dessus et donc vous n'avez jamais exactement les mêmes à chaque fission. Donc, en fait, les produits de fission couvrent une très large variété de numéros atomiques, comme vous le voyez là. Cela étant, ils sont quand même centrés sur deux ensembles où vous allez préférentiellement retrouver vos produits de fission.

Le numéro atomique initial de l'uranium c'est 92, et donc, en gros, vous allez retrouver à l'arrivée des éléments de numéro atomique 30 et 60, je dis bien en gros. Les neutrons ne comptent pas, évidemment, ça ne compte pas dans les numéros atomiques. Donc, à l'arrivée, vous allez retrouver 30 et 60 en ordre de grandeur. Donc, vous allez retrouver en particulier de l'iode. Alors, beaucoup de ces produits de fission sont radioactifs. Vous allez trouver de l'iode, du césium, du strontium, du krypton, etc. Les produits de fission pour l'essentiel sont radioactifs avec des demi-vies qui vont d'une fraction de seconde jusqu'à des milliers d'années. Il y a un peu de tout là-dedans.

24. LA FISSION, C'EST LE GRAND BAZAR...

L'essentiel des produits de fission ont quand même des demi-vies qui n'excèdent pas quelques dizaines d'années. La radioactivité des produits de fission est une radioactivité qui décroît très vite.

25. Après une fission, c'est le grand bazar… (bis)



Diapositive 26.

Dans une fission, parmi les neutrons qui sont créés, une partie est absorbée par les noyaux d'uranium que vous avez dans le réacteur et en particulier l'uranium 238. Ces noyaux vont se transformer en des noyaux dont le numéro atomique est au-delà de l'uranium : du plutonium, du protactinium, de l'américium, du curium, etc.

Ces éléments-là, dans le tableau de Mendeleïev, s'appellent des *actinides*, et souvent, on appelle ça des actinides mineurs parce que, de fait, ils sont présents en petites quantités dans la barre de combustible, enfin dans la barre d'oxyde d'uranium.

Certains de ces actinides vont fissionner en cours de réaction, et d'autres non. Donc, vous allez les récupérer dans le combustible usé qu'on ressort à la fin. Je le disais, l'uranium 235 aime bien les neutrons thermiques. Donc, au moment où ils sont éjectés, les neutrons sont trop énergétiques pour être utilisés par un autre noyau d'uranium 235. Or, l'idée c'est que lors d'une fission d'ura-

nium 235, les neutrons émis à l'occasion de cette fission, puissent servir pour aller fissionner ensuite d'autres noyaux d'uranium 235.

Alors ça veut dire deux choses cette histoire-là.

Ça veut dire d'abord que le neutron qui va aller fissionner un nouveau noyau d'uranium 235, il ne doit pas aller trop vite, sinon ça ne marche pas. L'uranium 235, il est comme moi au tennis, ce n'est pas « Roger Federer », donc il ne sait pas attraper les neutrons qui vont trop vite. Et donc il faut le ralentir dans un premier temps. Et alors pour ça, on va utiliser ce qui s'appelle un *modérateur*. L'élément modérateur ralentit le neutron qui a été créé – comme les boules dans un jeu de billard – jusqu'au moment où il a perdu suffisamment d'énergie par chocs élastiques sur d'autres petits noyaux pour devenir un neutron thermique.

Alors vous savez que c'est lors d'un choc élastique entre deux objets de même masse que vous perdez le plus d'énergie cinétique dans l'objet incident. Quand vous avez un choc élastique sur un mur parfait, vous ne perdez rien. Donc si vous avez une masse infinie en face de vous, lors du choc élastique, vous ne perdez absolument pas d'énergie. C'est un exercice de mécanique classique, la perte d'énergie est maximum lorsque vous tapez contre un truc qui a exactement votre masse. Si vous tapez contre un truc qui a une masse microscopique, vous perdez très peu d'énergie aussi, par contre l'autre truc part à toute vitesse, mais ça n'emporte pas beaucoup d'énergie.

Pour ralentir, il faut que vous tapiez sur un truc qui a la même masse que vous. Or, qu'est-ce qui a la même masse qu'un neutron ? Et bien un autre neutron ou un proton. Donc le meilleur modérateur qu'on ait, ce sont les noyaux d'hydrogène de l'eau. Et donc, c'est la raison pour laquelle le modérateur qu'on met dans un réacteur, par excellence, c'est juste de l'eau, qui soit dit en passant sert aussi de caloporteur : elle sert aussi à évacuer la chaleur.

Du coup, vous avez un élément de sécurité passive qui est que si vous perdez le caloporteur – s'il y a une fuite dans le circuit par exemple –, certes vous n'êtes plus capable de refroidir votre cœur, mais par ailleurs la fission s'arrête. C'est un élément de sécurité passive important.

Comme une fission produit entre 1 et 4 neutrons, si vous voulez que votre réaction en chaîne soit stable, c'est-à-dire qu'au cours du temps, elle vous produise toujours la même quantité d'énergie, les 1 à 4 neutrons que vous avez produits lors d'une fission doivent se transformer en un neutron capturé par un autre noyau d'uranium 235 et juste un. Si, à partir d'un noyau qui fissionne, vous faites capturer deux neutrons par deux autres noyaux, puis 4, puis 8, puis etc. ça devient une bombe. Vous avez un truc qui diverge très vite et c'est, soit dit en passant, exactement le principe de la bombe atomique.

25. APRÈS UNE FISSION, C'EST LE GRAND BAZAR… (BIS)

Dans la bombe atomique, les premières fissions génèrent une réaction en chaîne qui va très, très vite et tout ça fait « boum ! ». Alors, dans un réacteur, ça ne peut pas aller jusqu'au niveau d'une bombe atomique, mais ça peut quand même faire exploser le réacteur, c'est exactement ce qui s'est passé à Tchernobyl. Et donc, si vous ne voulez pas que ça arrive, vous devez faire en sorte que, pour chaque fission d'un atome d'uranium 235 produisant un neutron, tout neutron excédentaire généré soit absorbé par quelque chose présent dans le réacteur. Ceci permettra de n'avoir à l'arrivée qu'un seul nouveau neutron pour fissionner un autre noyau d'uranium 235.

Et donc vous avez dans un réacteur, outre la matière fissile, deux constituants qui sont absolument essentiels, qui sont d'une part, *des absorbeurs de neutrons*, *notamment le bore*, et d'autre part, *un modérateur*, *typiquement de l'eau*.

Vous avez des réacteurs dans lesquels le modérateur est du graphite, mais aujourd'hui on ne fait plus ça pour plein de raisons, dont le fait que si vous perdez le caloporteur, vous ne perdez pas le modérateur et donc ça n'empêche pas la réaction de continuer à se produire. Donc là, vous êtes dans un très mauvais cas de figure dans lequel la réaction continue à se produire et vous n'avez pas de quoi refroidir le cœur. Donc les réacteurs à graphite – et Tchernobyl était un réacteur à graphite – vous n'en trouverez pas en fonctionnement en France. Vous en trouvez en cours de démantèlement mais pas en fonctionnement. Donc le but du jeu dans un réacteur, c'est que vous ayez en régime permanent, pour chaque fission : exactement un des neutrons créé qui sert à fissionner un autre noyau.

Si vous voulez faire monter votre réacteur en puissance, transitoirement vous allez passer de 1 à 1,000 000 1, un tout petit peu plus que 1, et si vous voulez calmer votre réacteur, vous allez faire exactement l'inverse c'est-à-dire que pendant un temps vous allez passer de 1 à 0,999 999 jusqu'au moment où votre truc descend un peu en puissance.

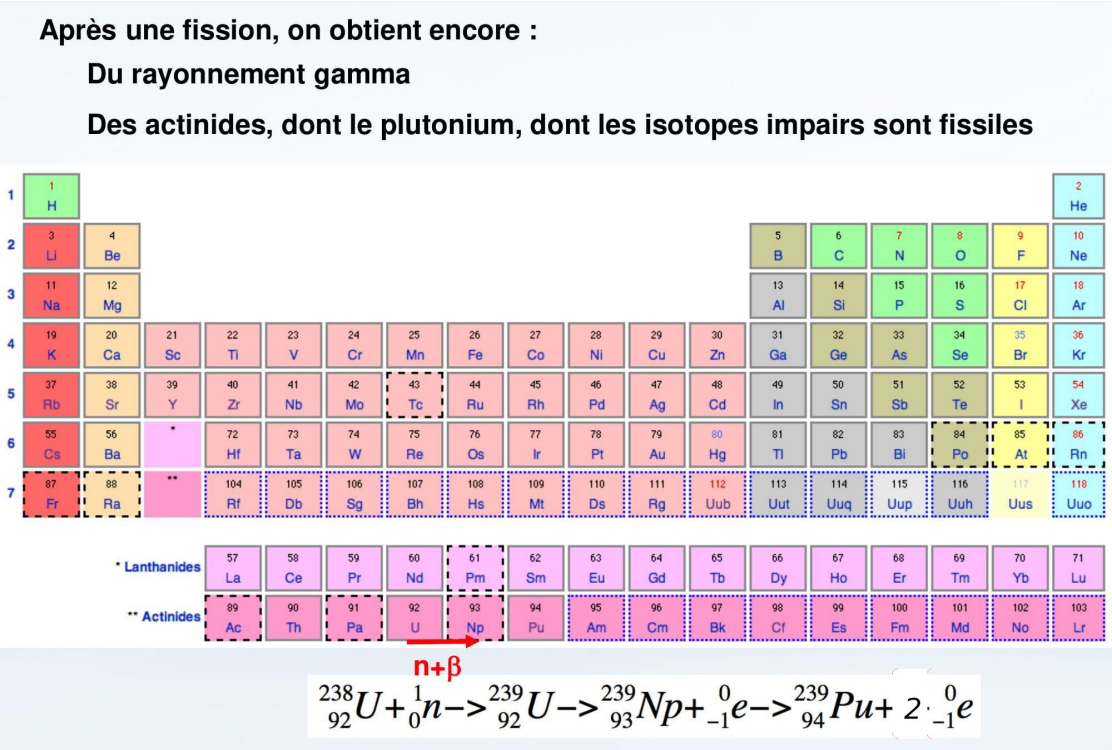
Là-dedans, vous avez également l'émission de *rayonnement gamma*. Alors normalement, les neutrons ne sortent pas trop du réacteur puisqu'ils sont absorbés avant, par contre vous avez plein de rayonnement gamma qui sort du réacteur. C'est pour ça que l'on évite de se promener à côté d'un réacteur en fonctionnement et que tout ça est protégé dans une cuve en acier que l'on appelle une enceinte de confinement.

Dans cette cuve en acier, vous avez vos assemblages d'oxydes d'uranium et l'eau qui circule autour qui sert à la fois de modérateur et caloporteur. Tout cet ensemble, qui produit allègrement du rayonnement gamma, est placé à l'inté-

rieur d'une enceinte en béton qui garantit que les rayons gammas ne vont pas aller se balader à l'extérieur.

Comme ça, il n'y a pas de problème.

26. Après une fission, c'est le grand bazar… (ter)



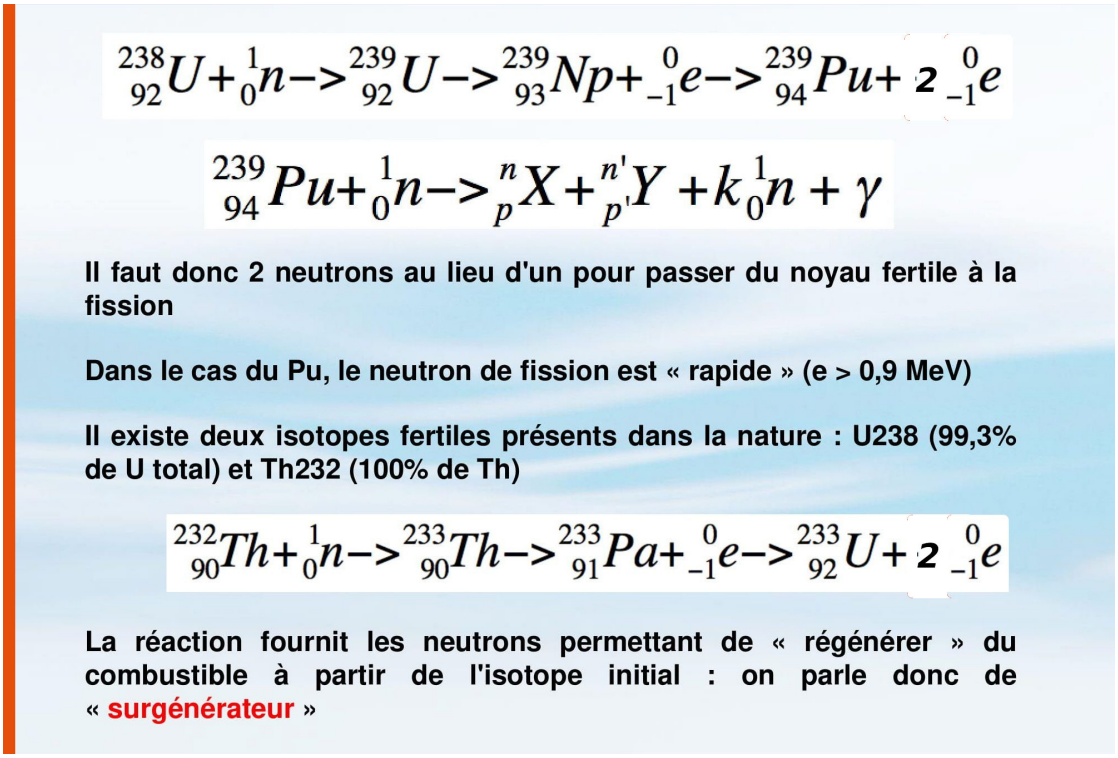
Diapositive 27.

Alors les actinides, j'y reviens, sont des produits de fission plus lourds que l'uranium dans le tableau périodique des éléments. Ils sont créés par absorptions successives de neutrons et désintégration radioactive.

Donc là par exemple, vous passez de l'uranium 238 au plutonium 239 en ayant commencé par absorber un neutron. À partir d'uranium 238, c'est comme ça que ça marche, parce que l'uranium 235, encore une fois, s'il absorbe un neutron, il fissionne. Je vous rappelle que dans un réacteur vous avez un mélange des deux isotopes uranium 235 et 238.

Dans les réacteurs français, l'uranium 235, au moment où vous enfournez l'uranium, c'est à peu près 3,5% du total. Donc ça veut dire que 96,5% c'est de l'uranium 238. Vous avez des réacteurs dans le monde qui fonctionnent avec de l'uranium dit naturel – donc à 0,7% d'uranium 235 –, mais à ce moment, il vous faut de l'eau lourde en général pour que ça marche.

27. Vous n'aimez pas les lents ? Prenez le rapide



Diapositive 28.

Donc là, voilà un truc qui va vous donner du plutonium.

Alors le plutonium aussi peut fissionner et à ce moment vous pouvez imaginer un réacteur qui est basé, non pas sur la fission de l'uranium 235, mais sur la génération en continu de plutonium puis la fission du plutonium : c'est ça qu'on appelle *le surgénérateur*.

Donc le surgénérateur, typiquement Phénix et Superphénix, c'est un réacteur dans lequel c'est l'uranium 238 qui sert de combustible, sauf qu'il sert de combustible en ayant besoin de deux neutrons. Donc c'est un truc qui est plus compliqué à piloter parce que vous devez tenir compte des temps de formation et des temps de décroissance radioactive pour générer et utiliser du plutonium fissile.

Il y a néanmoins deux avantages à ces réacteurs-là :

— Le premier c'est que *vous n'avez pas besoin de modérateur* : typiquement le plutonium sait fissionner avec des neutrons lents, enfin des neutrons ther-

miques, et des neutrons rapides, donc vous n'avez pas besoin de modérer les neutrons.

— Et le deuxième, c'est qu'évidemment, au lieu de brûler une toute petite partie de l'uranium, enfin au lieu de profiter d'une toute petite partie – parce que brûler est un terme impropre, l'uranium est un métal – au lieu d'utiliser une toute petite partie de l'uranium qu'on trouve dans la nature – l'uranium 235 c'est 0,7% de l'uranium qu'on trouve dans la nature – en utilisant des réacteurs de ce type-là, *vous utilisez la totalité de l'uranium qu'on trouve dans la nature*.

Donc ça veut dire que vous êtes capable de multiplier par un facteur 200 en ordre de grandeur le potentiel énergétique de l'uranium qu'on trouve dans la nature.

∗∗∗ Question auditoire ∗∗∗
« Et dans ce cas là c'est quoi le caloporteur ? Parce que si on met de l'eau . . . »
Alors typiquement pour Superphénix, le caloporteur c'était du sodium. Dans ces réacteurs rapides, c'est du sodium. Vous avez également une famille de réacteurs, vous avez plusieurs dessins là-dedans : un autre ce sont des sels fondus. Donc en fait vous avez un grand bain dans lequel tout est mélangé.

Mais les réacteurs rapides qu'on a fait fonctionner longtemps en France – il y a eu un réacteur industriel qui s'appelait Superphénix –, on les a arrêtés au titre d'un compromis politique, et démantelés.

Par contre, il y en a un autre qui est plus petit qui s'appelait Phénix, qui, lui, a fonctionné pendant 30 ans de façon tout à fait normale j'ai envie de dire, mais qui a aussi été arrêté et qui est en fin de démantèlement en ce moment.

Alors, on peut également se servir du thorium dans le même esprit. Donc le thorium, après absorption d'un neutron, se transforme en uranium 233, et l'uranium 233 est fissile. Donc c'est exactement le même principe qu'avec le plutonium, ce qui veut dire qu'il y a deux couples dans la nature qui peuvent servir à faire des réacteurs nucléaires à neutrons rapides et surgénérateurs : c'est uranium-plutonium ; ou thorium-uranium, mais ce n'est pas le même isotope, c'est le 233.

Alors cela étant, ces éléments, donc l'uranium 238 et le thorium 232, comme il faut leur envoyer des neutrons pour qu'ils se mettent à fissionner, ça veut dire que vous devez avoir une source de neutrons pour démarrer la réaction. Donc en fait, on ne peut pas démarrer un réacteur nucléaire juste avec de l'uranium 238 ou avec du thorium 232. On est obligé de démarrer avec un élément qui fissionne naturellement, donc l'uranium 235, et c'est une fois que la réac-

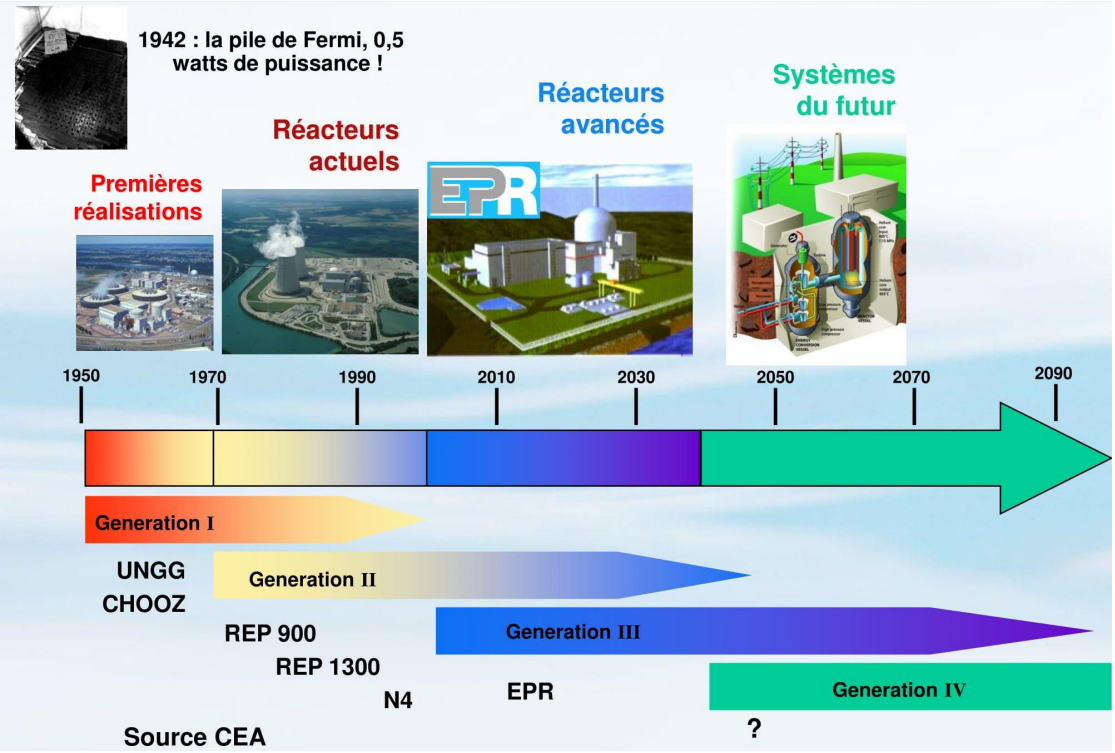
tion a démarré que l'on peut rajouter quelque chose derrière : de l'uranium 238 ou du thorium 232. Donc, en gros, ce sont des cycles qui permettent d'augmenter le potentiel d'une énergie nucléaire qui existe déjà à base d'uranium 235, mais ça ne permet pas de la remplacer en totalité.

∗∗∗ Question auditoire ∗∗∗
« Comment on fait pour maitriser le fait que, quand on part d'un générateur classique, les neutrons ne sont pas absorbés par l'uranium 238 pour faire du plutonium ? »
Si, en partie ils le sont, c'est ce que j'ai expliqué avant. Ils le sont et c'est comme ça que vous faites vos actinides. Le plutonium, une partie va fissionner dans le réacteur et une partie va rester dans l'assemblage quand vous le sortez en fin d'exploitation. On verra ça au moment des déchets. C'est exactement ce que je vous ai montré, alors j'y reviens si ce n'est pas clair.

Là, je vous ai dit qu'en fait, le seul isotope de l'uranium qui est capable de monter dans le tableau périodique des éléments c'est l'uranium 238. En gros, c'est assez simple. Vous enlevez un neutron à l'uranium 235, il fissionne, donc il ne peut plus monter en numéro atomique puisqu'il fissionne. Donc le seul qui peut monter en numéro atomique, c'est l'uranium 238. Il absorbe un neutron, après, suite à une désintégration bêta moins, cela vous créé un proton dans le noyau, et c'est comme ça que ça monte en numéro atomique. Et donc, vous allez monter comme ça, « crac crac crac », cela va ainsi créer du plutonium, du neptunium, etc. Vous créez ainsi d'autres éléments comme l'américium, le curium, tout un tas d'éléments lourds qui s'appellent tous des actinides.

Alors dans les réacteurs actuels, une petite partie fissionne. Mais dans les déchets et le combustible usé en sortie de réacteurs, vous allez en trouver quand même. Dans les plans imaginés pour une partie de *la génération 4*, certains souhaitent que l'on construise des réacteurs dans lesquels ces trucs-là sont brûlés au fur et à mesure qu'ils sont produits, ce qui est possible.

28. La bouilloire se perfectionne, bien sûr…



Diapositive 29.

Alors, parlons de générations justement.

Les générations, c'est comme les versions de Windows, donc c'est toujours le même principe, mais on dit que ça s'améliore.

Donc vous avez eu la *génération 1*, c'était des réacteurs à *uranium naturel graphite gaz*, il y en a un certain nombre qui ont été conçus en France. Ils ont tous été arrêtés au moment où ce qui tenait lieu d'autorité de sûreté – pas au sens où ça ne faisait pas vraiment de la sûreté, mais parce que ça ne s'appelait pas « autorité de sûreté » – a dit à EDF : « Ces trucs-là, on trouve que ce n'est pas terrible. Donc, ou bien vous faites tels et tels types de travaux de mise en conformité, ou vous arrêtez. »

EDF a fait ses calculs et a dit : « On arrête. » Donc, vous avez déjà eu en France une première vague d'arrêt de réacteurs avant terme, pas du tout pour des raisons politiques, pas du tout parce qu'on a dit : « C'est hyper dangereux, et puis tels électeurs souhaiteraient bien qu'on les arrête, etc. », pas du tout :

c'est l'autorité de sûreté qui a dit : « Ça, ça ne va pas, donc travaux de mise en conformité ou arrêt. » EDF a dit : « Arrêt. »

La *deuxième génération* c'est celle qu'on a aujourd'hui, c'est essentiellement en France des réacteurs à eau pressurisée, l'autre grande famille étant les réacteurs à eau bouillante.

La *troisième génération* est en fait une génération *2+* parce le concept ne change pas tellement. C'est *l'EPR* ou d'autres projets de cette nature.

Et enfin, il y a un certain nombre de gens qui réfléchissent à la génération suivante dite *génération 4* qui, aujourd'hui, est un concept au sens où le cahier des charges change et devient :

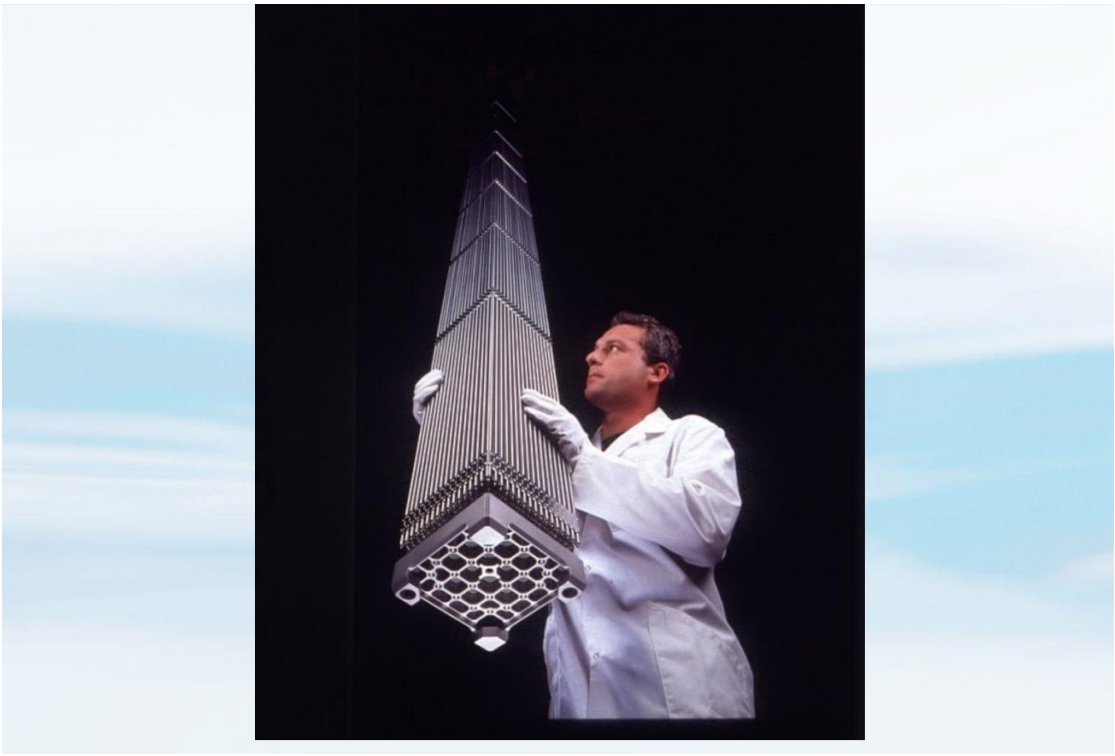
— Exploiter tout l'uranium et fermer le cycle. C'est-à-dire utiliser tous les éléments qui peuvent encore servir de combustible. Typiquement, le plutonium peut encore servir de combustible. On peut encore tirer de l'énergie du plutonium, donc c'est dommage de sortir du combustible usé du réacteur et puis d'aller mettre ça directement dans un trou ou dans un stockage de déchets, sans recycler, sans extraire de ce combustible ce qu'on peut encore valoriser à des fins énergétiques.

— Minimiser les déchets.

— Assurer la sûreté passive des réacteurs.

Donc, ces différents concepts sont explorés en ce moment.

29. Combustible ?

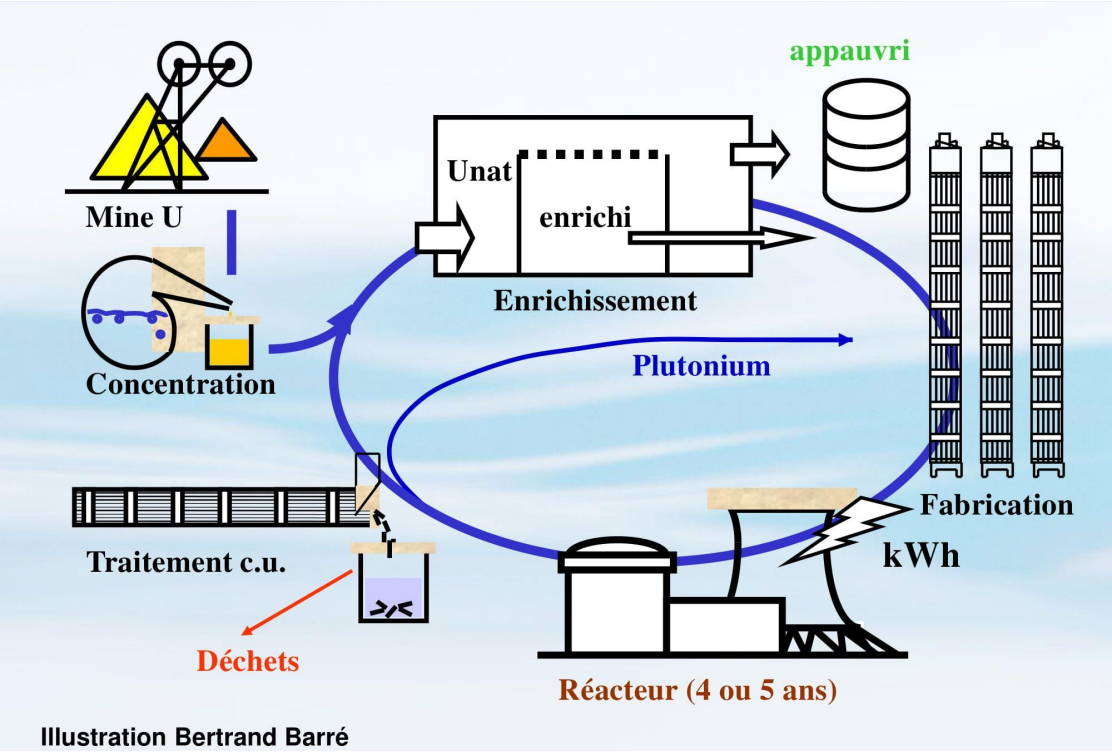


Diapositive 30.

Voici un assemblage d'uranium tel qu'on les utilise dans les réacteurs français. Donc là, vous avez des grands tubes en zirconium, en alliage de zirconium plus exactement, à l'intérieur desquels vous avez des pastilles d'oxydes d'uranium, c'est comme ça que c'est enfourné.

L'eau peut circuler entre ces petits tubes que l'on appelle des crayons. Et vous remarquez, et c'est un truc intéressant à savoir, que cet opérateur manipule cet assemblage – alors pas à mains nues pour ne pas mettre des traces de graisse – mais sans aucune protection radiologique. Donc, en fait l'uranium, au moment où il est enfourné dans le réacteur, ne présente aucune radiotoxicité particulière. Sa radioactivité naturelle n'est pas telle qu'il faille s'en protéger.

30. Entrez dans la ronde…



Diapositive 31.

Alors, si on parle des assemblages et de la manière dont c'est fait : voilà en gros à quoi ça ressemble.

Donc l'uranium, comme toutes les ressources que nous utilisons dans notre système économique, il est gratuit. Donc l'uranium c'est gratuit, ça a été fait par Mère Nature.

— Où est-ce que ça a été fait par Mère Nature ?
Réponses de l'auditoire.

— Ah non, lors du Big Bang, on n'avait que des protons. Mais j'ai entendu un truc qui commence à se rapprocher. Pas dans le Soleil, puisque pour importer de l'uranium du Soleil actuel sur Terre, c'est un peu compliqué.
Réponses de l'auditoire.

— Dans les anciennes étoiles, exactement. Ça a été fait dans la génération précédente d'étoiles.

30. ENTREZ DANS LA RONDE…

Si on retrace l'histoire de l'univers sur les 14 derniers milliards d'années, d'abord vous avez le Big Bang, une grande soupe de protons, la première génération d'étoiles. Et dans cette première génération d'étoiles, par fusions successives, vous avez tout le tableau de Mendeleïev qui se crée. Là-dessus, les étoiles, pour certaines d'entre elles, vous font des très belles supernovae, bazardent tout ça dans l'espace et une deuxième génération d'étoiles se forme. Et ces poussières issues de la première génération d'étoiles vont pour partie aller se mettre en orbite autour de la deuxième génération d'étoiles, se condenser et faire des planètes telluriques, typiquement la Terre.

Donc, pour faire une Terre avec 92 éléments du tableau de Mendeleïev, il faut attendre dix milliards d'années après le Big Bang. Recette de cuisine qui prend un peu de temps, et c'est gratuit. Donc l'uranium est gratuit comme tout le reste, il faut juste aller le chercher. Alors aller le chercher, ça va se faire comme pour tous les métaux, dans des endroits où il y a des concentrations particulières.

Vous trouvez n'importe quel métal n'importe où, si vous n'êtes pas regardant sur la concentration. C'est-à-dire que si j'extrais un mètre cube de terre là, de sous l'école des Mines, je vais probablement y trouver tous les éléments du tableau de Mendeleïev, mais certains sont présents dans des concentrations telles que je n'en ferai jamais rien. Donc, quand ils sont présents plus concentrés qu'ailleurs, ça s'appelle une mine. Dans une mine, vous allez chercher de l'uranium, vous allez le chercher sous forme d'oxyde en général comme tout le reste, mais vous avez tout un tas d'autres trucs qui ne vous intéressent absolument pas.

Donc d'abord vous sortez votre minerai et vous concentrez ce qui vous intéresse. Une fois que vous avez récupéré votre uranium, vous allez faire une opération qui s'appelle *l'enrichissement* pour les réacteurs français.

Alors l'enrichissement est un mélange compliqué de chimie et de physique, qui consiste à prendre préférentiellement dans l'uranium, l'isotope 235. Comme l'isotope 235 a très exactement les mêmes propriétés chimiques que l'isotope 238, puisque les propriétés chimiques ça dépend du nombre de protons donc d'électrons, il faut trouver un moyen pour séparer ces deux isotopes qui ne soit pas un moyen chimique. Vous ne pouvez pas purifier chimiquement de l'isotope 235, ça ne marche pas. Donc ça se fait avec des centrifugeuses.

Alors notez bien ce que je vais vous dire, parce que c'est le grand débat sur la prolifération. Une centrifugeuse c'est quoi ?

C'est un petit cylindre dans lequel vous faites tourner de l'hexafluorure d'uranium, un gaz, et vous allez mettre une écope à l'extérieur du cylindre et une écope à l'intérieur du cylindre – enfin près de l'axe de rotation.

Une écope, c'est un truc qui vous attrape ce qui passe. L'écope qui est près du bord du cylindre va vous prendre préférentiellement de l'uranium 238 parce qu'à cause de la force centrifuge, le 238 va avoir tendance à être préférentiellement plus près du bord, il est plus lourd. Et l'écope qui est près de l'axe de rotation vous prend préférentiellement du 235. Alors ce « préférentiellement », c'est une fraction de pour-mille dans chaque centrifugeuse. Donc, il faut les mettre en cascade les unes derrière les autres jusqu'au moment où ça vous a enrichi, pour l'écope du centre, votre uranium préférentiellement en 235 à hauteur de 3%. Mais c'est exactement la même chaîne qui permet de faire de l'uranium à 99,99% d'uranium 235. Il suffit juste d'en avoir des milliers.

Et c'est avec ça que les pays qui veulent accéder à l'arme nucléaire en général s'équipent. Donc c'est la même technologie que la technologie civile de la chaîne du combustible, sauf que si vous en avez suffisamment, ça permet de faire une bombe. Alors, quand le but du jeu n'est pas de faire une bombe, heureusement, vous séparez votre uranium pour, en gros, avoir une tonne d'uranium enrichi à 3,5%, il vous faut 5 tonnes d'uranium à 0,7%. Donc derrière, vous allez avoir une tonne d'uranium propre à faire du combustible et 4 tonnes d'uranium qui ne vous servent entre guillemets « à rien », ça s'appelle de l'uranium appauvri.

Alors l'uranium appauvri, est-ce que vous savez quelle était une des exploitations qu'on en a faite à un moment ?

Exactement, des lests pour des voiliers de course.

Parce que, comme c'est un métal extrêmement dense, ça fait des très grandes masses dans des petits volumes. Quand vous faites un voilier de course donc, vous allez mettre ça à quatre mètres sous la coque et ça vous fait des lests et ce n'est pas spécialement dangereux.

Une fois que vous avez votre uranium enrichi, donc vous en faites des pastilles d'oxyde d'uranium, vous mettez ça dans les tubes en alliage de zirconium et ça vous fait les assemblages que vous mettez dans le réacteur. Vous le laissez produire, donc fissionner pendant quelques années, et puis une fois que c'est sorti, alors là vous avez deux écoles en fonction du pays où vous êtes.

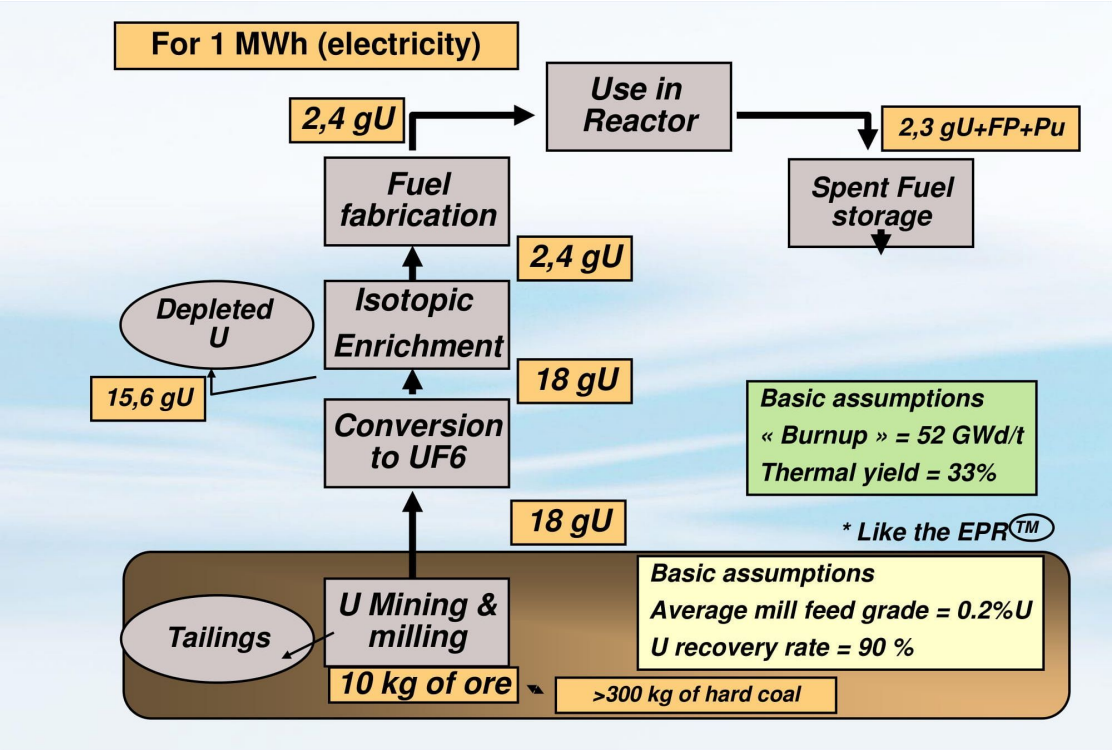
Vous avez des pays qui disent : « Je prends ça et ça c'est un déchet et je le stocke quelque part. » Alors aux Etats-Unis : sous Yucca Mountain.

Les Suédois, ils mettent ça dans des fûts en cuivre et ils collent ça sous terre.

En France, on a une autre école qui est de dire : « On va faire du recyclage là-dedans parce qu'il y a une partie de ce qui s'y trouve qu'on peut remettre dans des assemblages qu'on va ré-enfourner dans des réacteurs. » C'est à ça que sert l'usine de la Hague. Et, ce qui ne sert vraiment à rien, eh bien on s'en débarrasse d'une autre manière, c'est ça « l'école française » entre guillemets.

Donc vous avez deux écoles dans le monde. Et ce qui ne sert plus à rien, là, pour le coup, s'appelle vraiment des déchets.

31. Plus fort que les Jivaros : la réduction des poids



Diapositive 32.

Alors pour avoir quelques ordres de grandeur des masses en présence : pour un mégawattheure électrique, vous avez besoin de 10 kg de minerai qui vont vous donner quelques grammes d'uranium, donc vous voyez la concentration...

*** Question auditoire ***
Pourquoi 3,5% d'enrichissement pour l'uranium ? C'est ce qui permet de piloter une réaction de fission de façon confortable, j'ai envie de dire. Si vous en mettez 90%, ça vous fait une bombe, donc c'est incontrôlable, et si vous n'en mettez pas assez, en fait ça ne vous fait pas assez de neutrons et vous n'êtes pas capable d'avoir votre réaction en chaîne.

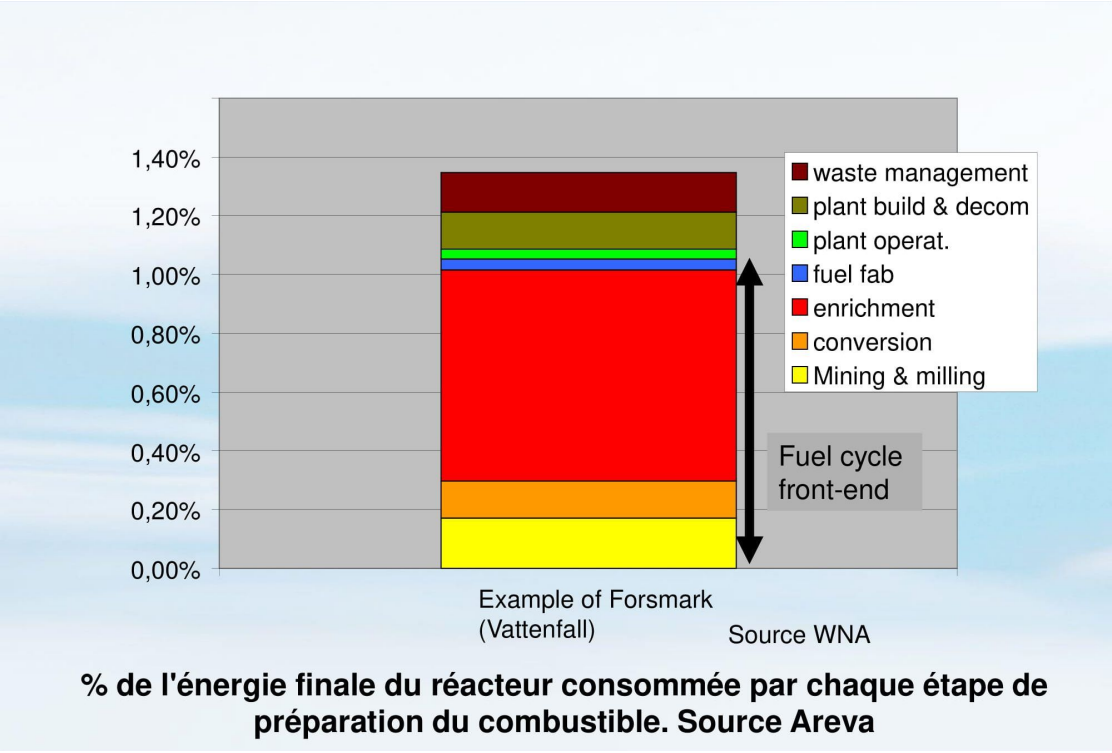
Donc je disais, à partir de 10 kg de minerai vous avez une petite vingtaine de grammes d'uranium. Donc vous voyez que la concentration en uranium du minerai est de l'ordre d'une pour mille, donc ce n'est pas des concentrations importantes, c'est de l'ordre du kg par tonne.

31. PLUS FORT QUE LES JIVAROS : LA RÉDUCTION DES POIDS

Vous avez un métal qui est présent encore à des teneurs encore plus faibles quand on exploite, c'est ? L'or. L'or, vous êtes typiquement à quelques grammes par tonne de minerai, 10 grammes par tonne. Donc là, vous êtes quand même très au-dessus.

Donc, on va faire de l'uranium enrichi et avec ça, vous allez faire votre méga-wattheure. Ce que vous montre ce genre de diagramme, c'est notamment, encore une fois, que vous avez besoin de manipuler de toutes petites quantités de matière pour faire des grandes quantités d'électricité. C'est vraiment par excellence la caractéristique du nucléaire.

32. Combien de kWh pour combien de kWh ?



% de l'énergie finale du réacteur consommée par chaque étape de préparation du combustible. Source Areva

Diapositive 33.

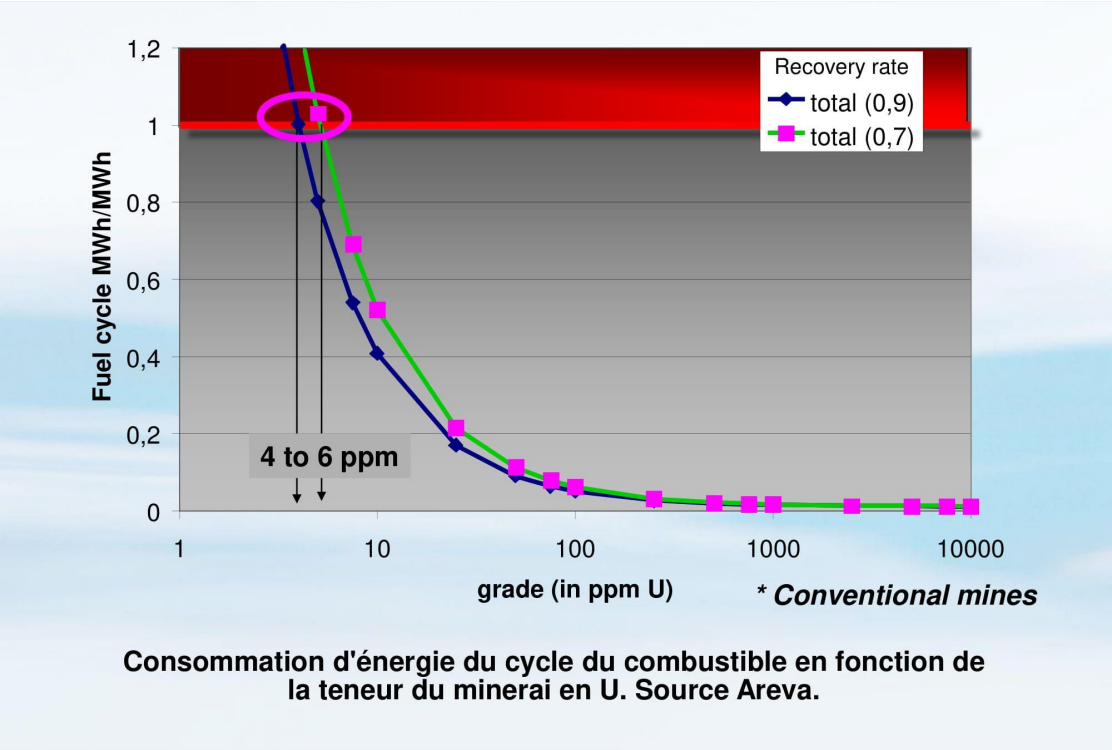
Bien évidemment, vous avez un rendement énergétique de votre affaire. Exactement comme pour le pétrole où vous devez utiliser une partie de l'énergie extraite pour pomper le pétrole, le raffiner, le transporter. En ce qui concerne l'uranium, vous avez besoin d'une partie de l'énergie fournie, alors pas sous la même forme parce qu'en l'occurrence dans les mines c'est du pétrole, mais vous avez besoin d'une partie d'énergie fournie pour faire fonctionner la chaîne. Vous avez besoin de mettre du diesel dans les engins de mines, de l'électricité dans l'usine d'enrichissement, etc.

Et donc il y a une question qui est : « Quel est le rendement énergétique de l'ensemble ? » Est-ce qu'on consomme 90% de l'énergie produite dans la chaîne ou est-ce qu'on en consomme juste une petite partie ? Et donc ce que vous montre ce graphique, c'est qu'on en consomme en fait juste une petite partie.

32. COMBIEN DE KWH *POUR COMBIEN DE* KWH *?*

Le rendement typique de la filière nucléaire, c'est de l'ordre de 1 pour 50 ou 1%, c'est-à-dire que la fraction de l'énergie qui est utilisée dans l'ensemble du cycle pour permettre à l'énergie nucléaire d'être produite, c'est de l'ordre de 1 à 2% de l'énergie produite, c'est de cet ordre-là.

33. kWh or not kWh : il faut compter…



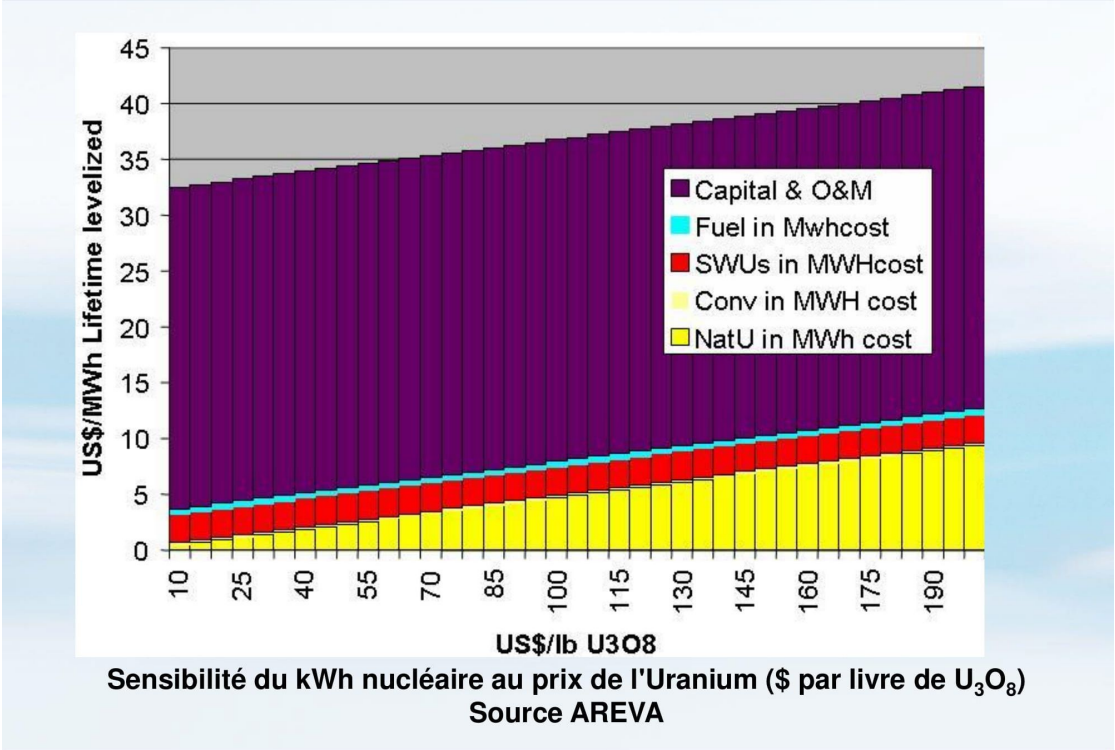
Consommation d'énergie du cycle du combustible en fonction de la teneur du minerai en U. Source Areva.

Diapositive 34.

En fait c'est extrêmement dépendant de la teneur en uranium du minerai. Ce que vous dit ce graphique, c'est qu'aux teneurs actuelles, on se balade plutôt par-là [entre 50 et 100 ppm]. Mais si vous avez des minerais suffisamment pauvres, eh bien il faut charrier une telle quantité de terre et purifier une telle quantité de matière, que vous pouvez évidemment vous retrouver avec un rendement plus faible, vous voyez. Donc en gros il faudrait perdre un facteur 100 dans la teneur en uranium du minerai pour que votre affaire commence à ne plus être intéressante.

Donc, on en est évidemment encore extrêmement loin.

34. Le kWh nucléaire est sensible au prix de l'U, mais pas trop



Sensibilité du kWh nucléaire au prix de l'Uranium ($ par livre de U_3O_8)
Source AREVA

Diapositive 35.

Par ailleurs, comme vous avez besoin de toutes petites quantités de « combustible » pour produire des grandes quantités d'électricité, le nucléaire est une industrie qu'on appelle à coûts fixes. Dit autrement, l'essentiel du coût économique de production du nucléaire se retrouve dans la construction de la centrale et dans la construction des installations, amont et aval, qui permettent de la faire fonctionner. Les coûts variables, et notamment les coûts de combustible, sont des coûts extrêmement faibles dans la chaîne.

Dit autrement, une fois que vous avez construit votre centrale, qu'elle fonctionne ou qu'elle ne fonctionne pas, ça vous coûte la même chose. Et en cela, c'est exactement la même structure de coûts qu'une éolienne ou un panneau solaire. Une éolienne ou un panneau solaire, une fois que vous l'avez construit, ça ne vous coûte quasiment plus rien. Enfin si, l'éolienne, il faut aller la maintenir un peu de temps en temps, le panneau solaire il faut lui passer un petit coup d'éponge pour enlever la poussière de temps en temps. Mais globalement,

vous avez des coûts de maintenance qui sont faibles. L'essentiel du coût est dans la construction du dispositif initial. Et le nucléaire c'est exactement pareil, l'essentiel du coût est dans la construction du dispositif initial.

Et alors là je vais refaire un tout petit peu de microéconomie. Quand vous avez un dispositif où vous devez mettre tout l'argent d'abord, et avoir des clients et des recettes ensuite, le coût auquel vous allez leur vendre le mégawattheure va dépendre de deux critères de manière absolument centrale :

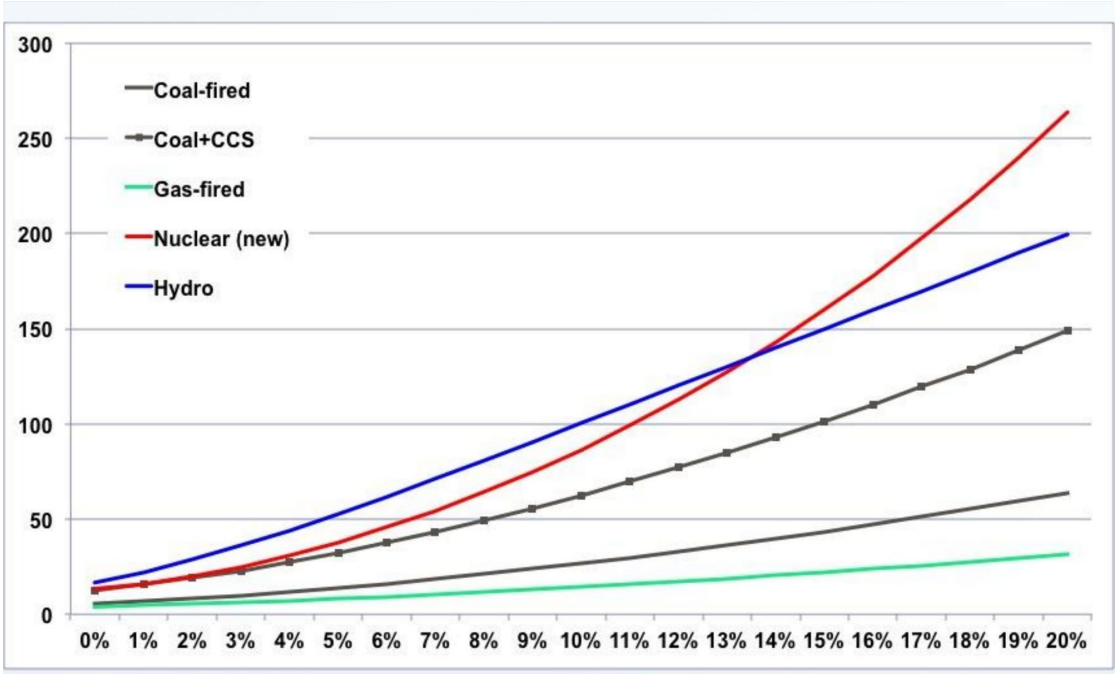
— *Le coût de construction*. Vous comprenez bien que si vous construisez pour deux fois plus cher toutes choses égales par ailleurs, vous vendrez pour deux fois plus cher.

— Ça dépend également d'un autre élément qui est absolument central – et qui, pour ceux d'entre vous qui ont vu passer un crédit immobilier ça vous rappellera des souvenirs – qui est ce qu'on appelle le *coût de l'argent*.

  C'est-à-dire le taux d'intérêt que vous devez payer, soit à votre actionnaire, soit à votre banquier, pour l'argent qui vous a été fourni pour construire la centrale. Donc, en gros, quand vous construisez une centrale, votre argent il ne tombe pas du ciel, votre argent il vient de deux sources et deux sources seulement : votre actionnaire et votre banquier.

  Donc, votre actionnaire investit dans le projet, il investit dans la centrale puis il dit : « Très bien j'ai mis mon argent mais tous les ans, je veux que ça me rapporte des dividendes, je veux gagner de l'argent. » Et votre banquier va vous dire exactement la même chose : « Je veux bien vous prêtez de l'argent mais à condition que tous les ans vous me payiez des intérêts sur la partie que vous ne m'avez pas encore remboursée. »

35. Bien plus important : le coût de l'argent



Part de l'investissement initial dans le cout du kWh en fonction du cout du capital

Diapositive 36.

Et alors ce que vous dit le graphique que je vous affiche maintenant, c'est combien ça vous coûte en euros par mégawattheure pour une centrale qui de mémoire était à 5000 euros le kilowatt installé, en fonction du loyer de l'argent.

Donc ce que vous voyez, c'est que si on vous prête l'argent gratuitement même avec un EPR construit cher et hors délai, eh bien le remboursement de l'investissement, c'est 20 euros le mégawattheure. Donc ce n'est pas beaucoup.

Par contre si vous avez un banquier ou un actionnaire qui vous dit : « Moi je considère que c'est vachement risqué cette histoire donc je vais vous demander 10%, donc tout l'argent que vous me devez encore ou que j'ai investi dans la boîte, eh bien tant qu'il est là, c'est 10% par an que vous devez me payer, c'est le rendement du capital. »

Eh bien si vous êtes à 10%, la part de l'investissement dans le coup du mégawattheure frise les 100 euros. Donc une très grosse différence entre le nucléaire pas cher et le nucléaire cher, c'est tout bêtement combien est-ce que les action-

naires et les banquiers vont vous demander en taux d'intérêt sur l'argent qui vous est nécessaire pour construire la centrale.

Et avec ce petit graphique, vous pouvez faire le calcul inverse en ce qui concerne Hinkley Point. Qui a entendu parler d'Hinkley Point ici ?

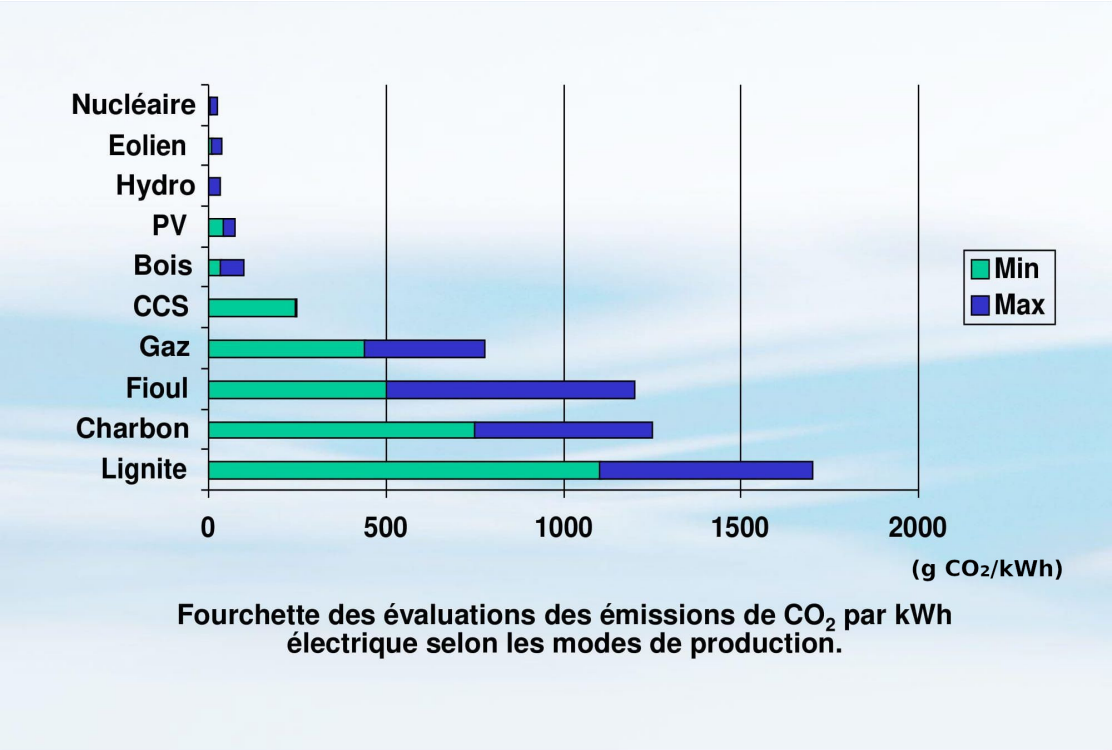
Alors Hinkley Point, c'est une centrale que les Anglais sont en train de construire et c'est une filiale d'EDF qui est en train de le faire. Donc « EDF energy », qui est le plus gros électricien anglais, une filiale d'EDF, est en train de le construire. Et alors dans le milieu des gens qui s'intéressent à la question électrique, les gens qui n'aiment pas le nucléaire vous expliquent que c'est horriblement cher, Hinkley Point, parce que ça va produire des mégawattheure à 110 euros. « Rendez-vous compte, 110 euros c'est très cher, beaucoup plus cher que d'autres trucs ! »

En fait avec ce petit graphique, vous êtes capable de savoir que ça vaut 110 euros le mégawattheure parce que les actionnaires et les banquiers demandent 10% de rendement sur capital investi. Et c'est exactement ça du reste, vous pouvez poser la question, c'est exactement ça, le taux.

*** Question auditoire ***
« Qu'est ce qui explique la différence avec les autres énergies ? »
Parce que la part du capital dans la structure de coûts, et la durée de construction, et la durée de vie ne sont pas les mêmes non plus. Donc en fait ça dépend également de la durée de construction de la durée de vie ces trucs-là. En fait, j'aurais dû effacer les autres courbes, ce n'était pas tellement le sujet. Le sujet c'est de montrer que, en ce qui concerne le nucléaire, ça augmente très, très vite avec le loyer de l'argent, avec le taux auquel on vous demande de rembourser l'argent.

Par ailleurs, le rendement des capitaux, et c'est aussi pour ça que le nucléaire n'aime pas l'investissement privé, le rendement des capitaux qu'on vous demande classiquement dans une entreprise cotée en bourse se balade aux alentours de 10-12%. Donc vous voyez que si on vous demande un rendement sur capital investi aux alentours de 10-12%, eh bien si vous êtes une entreprise cotée en bourse et que vous faites du nucléaire, vous ne savez pas le faire à moins de 100 euros le mégawattheure. Et c'est juste ça le sujet, parce que si vous êtes une société d'Etat et qu'on vous demande 0%, eh bien vous savez le faire – alors hors coûts variables –, vous savez le faire pour beaucoup moins cher que ça.

36. CO_2 or not CO_2 : il faut compter…



Diapositive 37.

Le nucléaire, comme je le disais tout à l'heure, ne suppose pas d'oxyder des atomes de carbone pour obtenir la source primaire d'énergie. Du coup, c'est une énergie dont les émissions de CO_2 par mégawattheure sont faibles. Alors il y a quand même un peu de CO_2 en analyse de cycle de vie parce que, comme je le disais tout à l'heure :

— Il y a des engins de mines qui utilisent du diesel.

— Il y a du transport du minerai, enfin du transport du combustible.

— Il y a des gens qui viennent bosser à la centrale en voiture.

— Il faut construire la centrale et donc couler du béton, et donc il faut le faire dans des cimenteries, des aciéries.

— Il faut traiter les déchets à l'aval, etc.

Donc tout ça fait que vous avez quand même des petites émissions de CO_2 à droite et à gauche, mais quand même, vous voyez que ce sont des émissions qui sont significativement plus faibles que celles des modes concurrents fossiles, notamment lignite, charbon et gaz. Vous voyez qu'on est significativement en dessous des valeurs qu'on a pour ces modes-là.

37. . . . mais le public n'en tient pas toujours compte !

Pour chacune des activités suivantes dites-moi si d'après ce que vous savez elle contribue beaucoup, assez, peu ou pas du tout à l'effet de serre (Réponse « beaucoup » + « assez »)

!!!

	Les activités industrielles	Les transports	La destruction des forêts	Les bombes aérosols	Le chauffage des bâtiments	Le traitement des déchets	Les centrales de production d'électricité **au gaz au charbon ou au fuel**	Les centrales nucléaires	L'agriculture et l'élevage	L'activité volcanique
2014	88	85	88	75	75	74	91*	53	66	36
2013	90	88	89	73	72	70	*64*	61	59	36
2010	90	88	90	70	70	69	*64*	61	59	42
2007	93	92	89	75	71	69	*59*	56	50	31
2004	90	88	87	73	58	70	*62*	63	41	28
2001	89	87	84	67	46	67	*52*	61	39	33
2000	85	83	79	64	39	57	*60*	59	33	30

- **La formulation de cet item a changé en 2014 : l'Ademe a ajouté « au gaz, au charbon ou au fuel », ce qui a provoqué une augmentation artificielle de cet item**

Baromètre Ademe / CSA

Diapositive 38.

Alors maintenant je vais vous montrer, non ça je ne vais pas vous le montrer parce que je n'ai pas le temps.

∗∗∗ Question auditoire ∗∗∗
« C'est pour quelle durée de fonctionnement ça ? Parce que d'habitude, le coût carbone il est essentiellement initial et final, du coup plus la centrale fonctionne longtemps, plus ça . . . »
Non, le coût carbone essentiellement est dans l'amont du cycle, il est dans la mine, et l'enrichissement.

∗∗∗ Question auditoire ∗∗∗
« CCS, qu'est ce que c'est ? »
CCS c'est *Carbon Capture and Storage*, c'est le truc dont j'ai parlé la dernière fois.

∗∗∗ Question auditoire ∗∗∗
« Le coût du démantèlement, est ce qu'il est pris en compte ? »
Alors le coût CO_2 du démantèlement est très faible, parce que le démantèle-

ment, c'est essentiellement passer avec une scie à diamant et découper le truc. Quand vous faites du démantèlement, vous n'avez pas besoin de fondre de l'acier, vous n'avez pas besoin de faire du ciment, vous n'avez pas besoin d'avoir des engins de mines qui vous extraient une tonne pour récupérer 10 kg de minerais à l'arrivée. Donc, en fait ce sont des opérations qui demandent beaucoup de temps parce qu'elles sont très réglementées, mais en termes de flux physiques associés, et donc d'émissions de CO_2 associées à ces opérations-là, ce sont de toutes petites quantités.

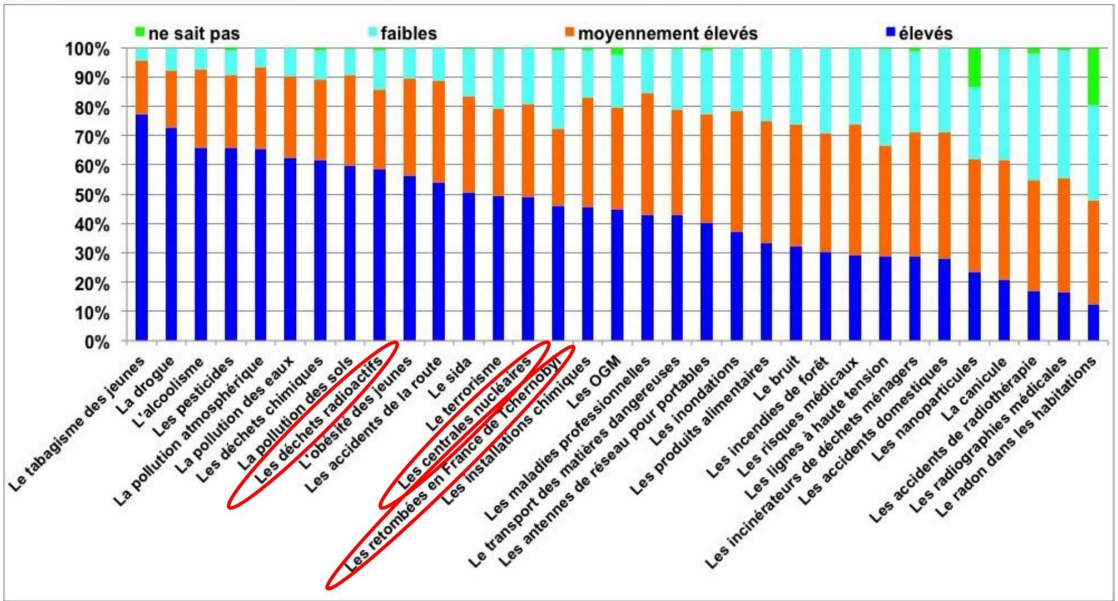
∗∗∗ Question auditoire ∗∗∗
« Pour ça d'accord, mais après pour le prix du kilowattheure . . . »
C'est pareil, ça ne change pas les ordres de grandeur, en gros le démantèlement d'une installation industrielle compliquée, que ce soit un réacteur nucléaire ou une raffinerie, c'est 10 à 15% du coût de construction. C'est très très dépendant du niveau de réglementation applicable. Un exemple typique de réglementation contraignante c'est : « N'importe quoi qui sort d'une centrale à l'arrêt est considéré comme un déchet nucléaire. » D'accord ? Indépendamment du fait que si je mesure la radioactivité, ce soit effectivement contaminé ou pas.

Vous avez une réglementation à la chinoise pragmatique qui dit : « Je mesure, si c'est contaminé je stocke, si ce n'est pas contaminé, ça va bien. » Et la réglementation française c'est : ça sort du site, c'est « déchet », je le traite en tant que tel.

Vous voyez, simplement cette différence-là, augmente le coût et augmente les délais. Puis après, des trucs comme ça, vous en avez pléthore dans ce genre d'opération.

Vous avez, une centrale aux Etats-Unis qui a été ce qu'on appelle « retournée au gazon », c'est-à-dire qu'à la place de l'ancienne centrale, vous avez aujourd'hui effectivement un champ, qui s'appelle *Maine Yankee*, donc comme un yankee, un Américain, et *Maine* comme l'état du Maine. Donc allez voir si ça vous intéresse. Et en fait, l'opération de démantèlement du réacteur a été faite pour 450 millions de dollars si ma mémoire est bonne, sachant que le réacteur neuf coûte 5 milliards, enfin 3, vous voyez on est dans ces ordres-là, 10-15%. Et je tiens du patron de Total lui-même à qui j'avais posé la question que, pour une raffinerie, c'est pareil : c'est 10 à 15%. C'est pareil, c'est un truc compliqué avec des tas de produits que vous n'avez pas envie de voir se balader partout dans la nature. Même ordre de grandeur.

38. L'avis qu'on en a



Perception du risque par la population pour divers facteurs. Source Baromètre IRSN, 2014

Diapositive 39.

Voilà. Donc là je vous ai expliqué à grosses mailles quel était le principe de l'énergie nucléaire. Donc c'est une manière d'obtenir des grandes quantités d'énergie avec très peu de matière, sans combustion. Ça a cet avantage-là, ça a évidemment des inconvénients dont je vais vous parler maintenant ; enfin des inconvénients, des contreparties.

Il y a quelque chose d'intéressant, c'est que le nucléaire en France, pour des raisons que je n'ai toujours pas complètement explicitées, a une très forte asymétrie entre les risques perçus et les risques réels. C'est un domaine dans lequel les gens ont très, très peur et vous allez voir que le fait qu'ils en aient très peur se quantifie. Ils se font plein d'idées qui ne sont pas conformes aux faits, et vous allez voir aussi que ça se quantifie. Cette peur n'existe pas nécessairement dans les autres industries.

Alors, vous avez ici un sondage de l'IRSN [Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire] en 2014 – il faut savoir que ces sondages-là, depuis que je les suis, ça varie assez peu d'une année sur l'autre. L'IRSN a demandé aux

Français si un certain nombre de choses étaient : risquées, un peu risquées ou pas risquées du tout. Donc là, la question c'est : « Est-ce que vous pensez que les risques sont élevés, moyennement élevés, faibles ou bien vous n'en avez pas la moindre idée ? »

Alors voilà, on vous demande ça pour le tabagisme, la drogue, l'alcoolisme, etc. enfin des trucs pour lesquels les gens ont une idée raisonnablement fiable, on va dire, du fait que ce n'est quand même pas terrible. Et puis voilà, quelques sujets qui concernent le nucléaire. Et alors vous voyez, pour les déchets radioactifs, eh bien, la population française considère que c'est plus risqué que tout ce que vous avez à droite là.

Donc, la population française a plus peur des déchets radioactifs que de l'obésité chez les jeunes, que des accidents de la route, que du sida, que du terrorisme, que des OGM, que des maladies professionnelles, que des installations chimiques, que des produits alimentaires, que des inondations, que des incendies de forêts, que des risques médicaux, etc. Voilà, donc tous ces trucs-là.

Pareil pour – alors bon les centrales nucléaires ce n'est pas très précis, il aurait fallu être peut-être un peu plus précis mais bon – les retombées en France de Tchernobyl, dont je vous parlerai aussi, vous voyez, c'est considéré comme étant plus risqué que tous ces trucs-là.

Alors ça, c'est la perception de la population, et maintenant on va regarder ce que vous disent les chiffres.

39. Ce que disent les chiffres



Diapositive 40.

Que disent les chiffres ?

— Alors les chiffres vous disent que *le tabac* fait de l'ordre de *quelques dizaines de milliers de morts* prématurés par an. Alors pour ceux d'entre vous qui fument, dans cette salle, bonne nouvelle : pas tout de suite, encore que… Deuxième bonne nouvelle : vous pouvez très bien choper une hémiplégie, un AVC – donc un accident vasculaire cérébral et une hémiplégie – à votre âge. Voilà j'ai connu ça avant, alors pas moi personnellement mais je l'ai vu se produire donc je sais que c'est possible. Voilà donc ça, ça fait 70 000 morts. Vous voyez la drogue, etc.

— Alors, *les déchets nucléaires* à ce jour ont fait *zéro mort*. Absolument personne n'est mort d'avoir ingéré, ou s'être fait tomber un fût de déchets nucléaires sur la tête, etc.

— Alors *l'obésité*, ils disaient « chez les jeunes ». Alors, si on considère que les

jeunes finiront par être moins jeunes, ce dont je suis un exemple parmi d'autres, ça finira par faire quelques dizaines de milliers de morts par an.

— *Le nombre d'accidents de la route* est monté jusqu'à 20 000 morts par an au milieu des années 1970. Maintenant, c'est dix fois moins en ordre de grandeur.

— *Le sida* est responsable de quelques centaines de mort.

— *Le terrorisme*, quelques dizaines, en moyenne.

— Là, vous avez de nouveau zéro pour les *centrales nucléaires et les retombées de Tchernobyl*.

— *Les maladies professionnelles* et les *accidents du travail* entraînent quelques centaines de morts.

— Alors là, pour les *accidents domestiques*, je vous ai mis 10 000 morts, mais c'est plutôt 20 000. Donc par exemple, en France, les escaliers font considérablement plus de morts que les déchets nucléaires. Ça fait à peu près autant de morts par an que les accidents de la route.

— Le *radon*. Est-ce que vous savez ce que c'est que le radon ? Alors cet isotope-là est radioactif, absolument, et c'est un gaz – qui apparaît par décroissance radioactive, si ma mémoire est bonne, du radium – qui provoque un surplus de cancers du poumon. C'est un gaz qui est à décroissance radioactive assez rapide, et il apparaît préférentiellement sur les massifs granitiques et dans les habitations mal ventilées. Donc si vous avez – vous-mêmes ou vos parents, vos grands-parents, oncles, tantes, etc. – une maison à la cave mal ventilée en Bretagne ou en Auvergne par exemple, n'y traînez pas trop longtemps, d'accord ? N'allez pas vous y installer en logement quotidien. Donc, on inhale ce gaz, qui va vous émettre des particules alpha dans les alvéoles, qui n'aiment pas ça.

Donc vous voyez ici que la hiérarchie des risques n'est pas du tout perçue comme étant conforme aux données d'observation.

*** Question auditoire ***
« Comment on évalue les risques liés aux déchets nucléaires ? Autant pour l'obésité et l'alcoolisme ça va, mais pour les déchets ? »
Il n'y en a pas. Tous les déchets nucléaires sont à la Hague, dans une piscine. Dans les centrales nucléaires, c'est pareil. Aujourd'hui, les travailleurs du nucléaire sont surveillés avec des dosimètres et il y a une limite légale qui est 20 millisieverts par an. Je ne sais pas si je vous ai déjà posé la question : est-ce

que vous savez qui est le salarié français le plus irradié ?
∗∗∗ Réponse de l'auditoire ∗∗∗

Pas mal. Comment s'appelle-t-il ? Thomas Pesquet. Thomas Pesquet est le salarié français le plus irradié de la totalité des gens qui sont payés dans ce pays. Thomas Pesquet prend, quand il va faire un séjour de quelques mois dans la station spatiale internationale, neuf fois la dose maximale admissible pour un travailleur du nucléaire.

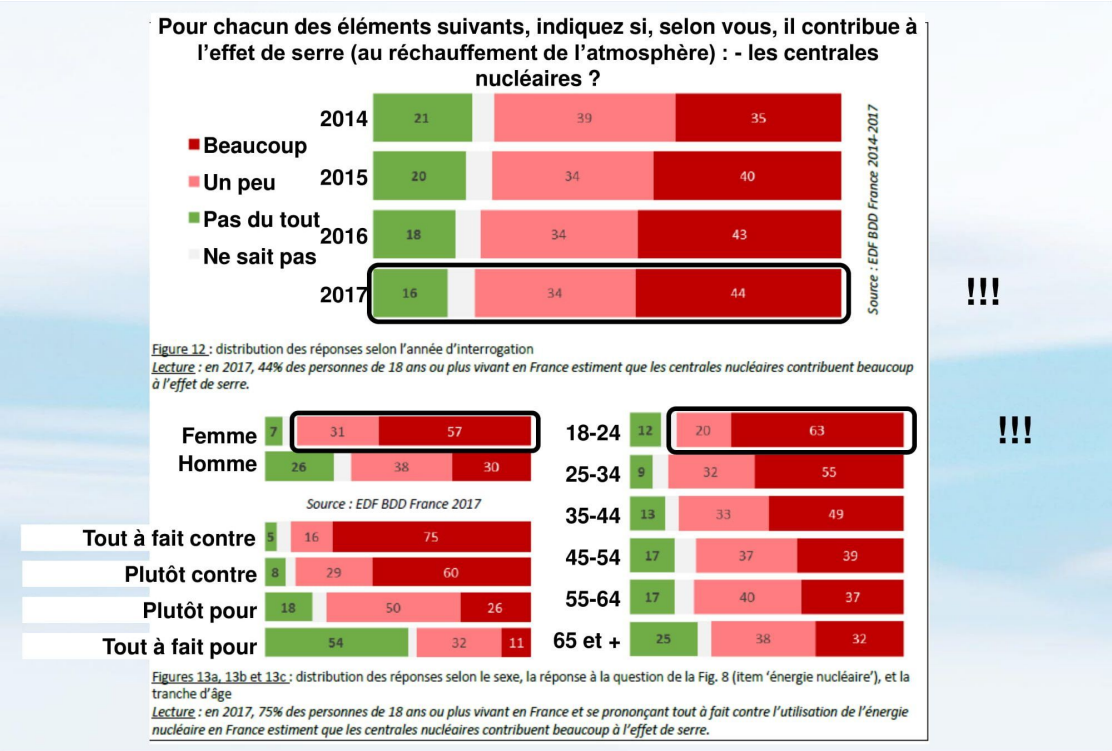
Après, la deuxième catégorie a effectivement été citée : c'est le personnel navigant aérien, qui prend chaque année entre le quart et la moitié de la dose maximale admissible pour un travailleur du nucléaire. Et il n'y a pas de dosimètre pour eux.

Donc, ces trucs-là sont surveillés. Soit dit en passant, le personnel aérien navigant n'a pas non plus plus de cancers que la moyenne. Enfin pas à cause des rayonnements ionisants en tout cas. C'est peut-être à cause d'autres conduites à risque mais c'est sûr que ce n'est pas à cause des rayonnements ionisants.

∗∗∗ Question auditoire ∗∗∗
« Est ce que c'est vraiment possible de mesurer l'impact des retombées de Tchernobyl ? »
Je vous en parlerai plus tard.

∗∗∗ Question auditoire ∗∗∗
« Est ce que finalement les fumeurs ne sont pas pas mal irradiés aussi, à cause des composés qu'il y a . . . »
Si. Mais, je ne suis pas complètement sûr que, s'il n'y avait pas ces composés-là, ce serait complètement innocent de fumer.

40. En démocratie, ce que pense l'électeur, non les faits



Diapositive 41.

Voilà une autre asymétrie intéressante sur la perception des Français et les risques réels. Ici, on a demandé aux Français : « Le nucléaire contribue-t-il ou non aux émissions de gaz à effet de serre ? » Alors, vous voyez que les gens en rouge foncé disent « beaucoup » et les gens en rouge clair disent « un peu ».

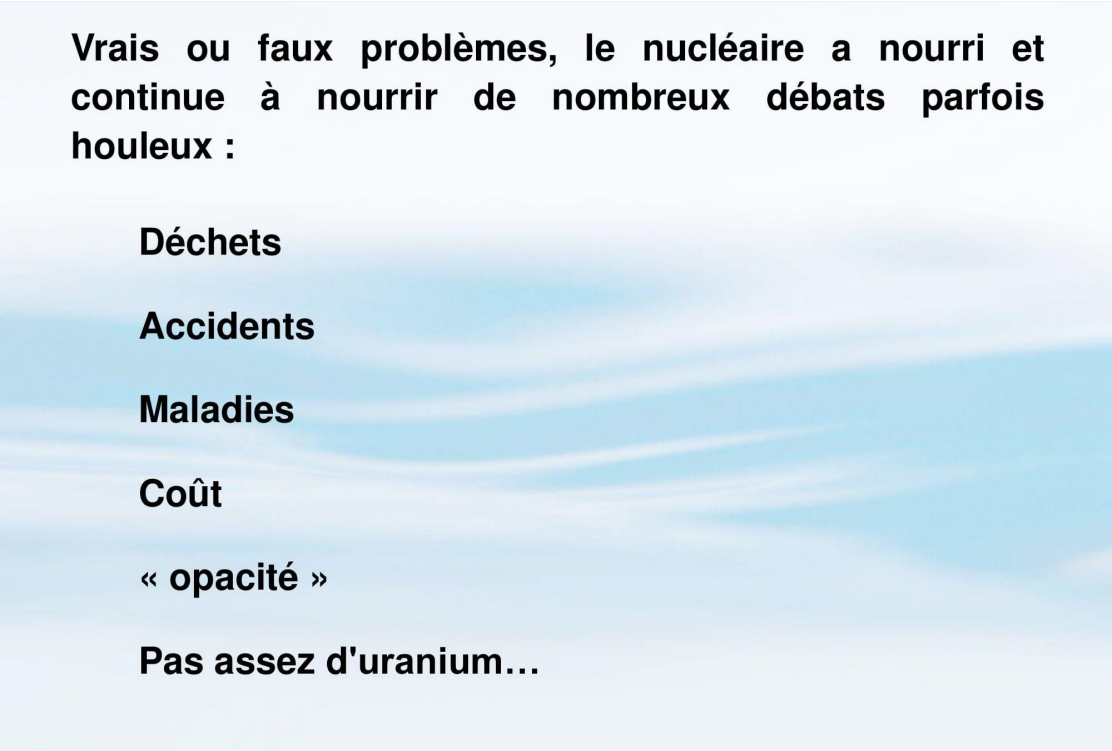
Et alors, les jeunes filles dans cette salle sont l'archétype des gens qui pensent que ça contribue énormément. Tous les gens dans cette salle d'une manière générale le pensent plus que la moyenne, puisque vous êtes jeunes, et que les jeunes le pensent plus que la moyenne, et les femmes le pensent plus que les hommes.

Alors, trêve de plaisanteries, vous voyez que là – je ne sais pas comment il faut appeler ça, une dissonance cognitive peut-être – vous avez une dissociation totale entre un fait et une perception, parce que, pour le coup, c'est sûr que

casser un noyau de métal en deux n'est pas la même chose qu'oxyder un atome de carbone. C'est sûr que ce n'est pas la même chose.

Alors une explication possible de la part des gens qui suivent ça est que, comme l'image d'Epinal du nucléaire est un truc qui fume, les gens se disent : « Ce truc-là, c'est chaud, ça fume, donc ça contribue au réchauffement. » Ce n'est pas complètement idiot de se dire ça. Une autre explication possible est de se dire : comme dans notre pays on n'arrête pas de dire « il faut s'occuper du changement climatique », et par ailleurs « il faut fermer des réacteurs nucléaires », les gens bouclent la boucle en disant que « les réacteurs doivent contribuer au changement climatique ». C'est une autre possibilité, je ne sais pas.

41. Le nucléaire, parfois sujet préféré des journalistes

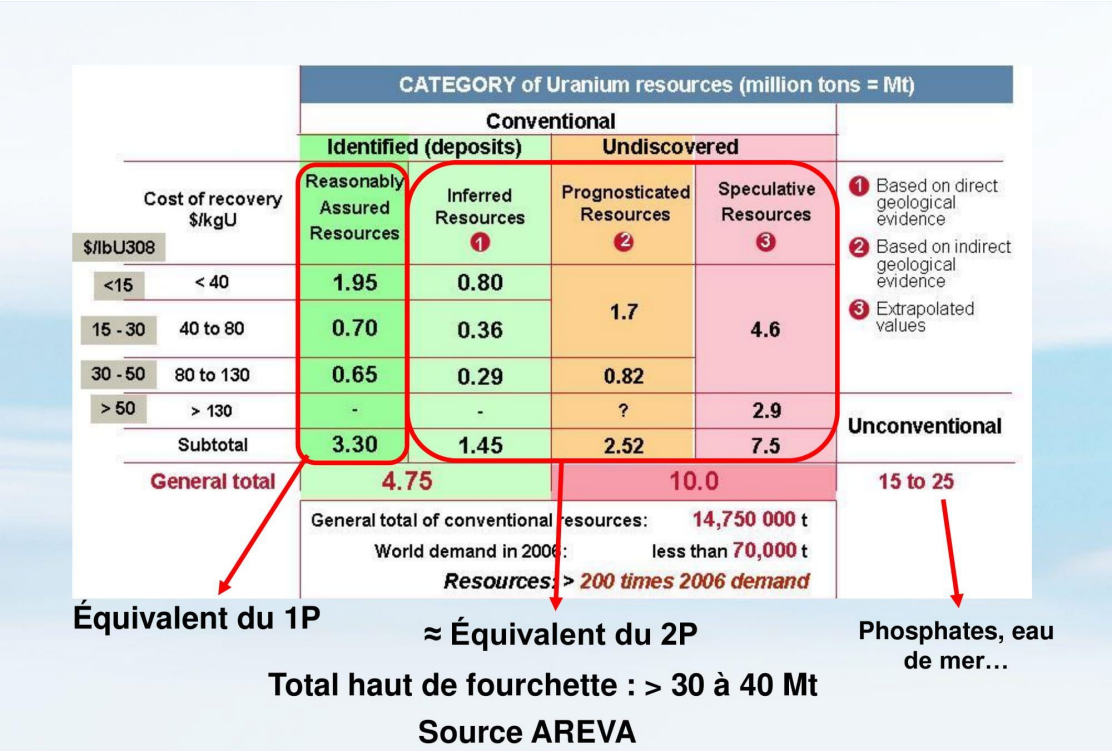


Diapositive 42.

∗∗∗ Intervention auditoire ∗∗∗
« Oui mais la vapeur d'eau c'est quand même le premier gaz à effet de serre. »
Oui, mais les émissions humaines sont totalement marginales dans le cycle naturel de l'eau. Je ne sais pas si vous étiez là au moment du cours sur le changement climatique, mais j'en ai parlé. Une des sources de vapeur d'eau qui modifie significativement le climat local est le barrage d'Assouan en Egypte, parce que là, on a fait une source d'évaporation absolument massive par rapport à la surface du pays.

Mais les tours de réfrigération des centrales thermiques, que ce soit nucléaire ou à charbon, sont totalement insignifiantes sur une Terre qui est couverte aux deux tiers d'océans. Alors concernant les inconvénients ou les contreparties du nucléaire, on va en parler un tout petit peu maintenant. Les voici. Je vais commencer par le dernier.

42. On joue au petit jeu des réserves ?



Diapositive 43.

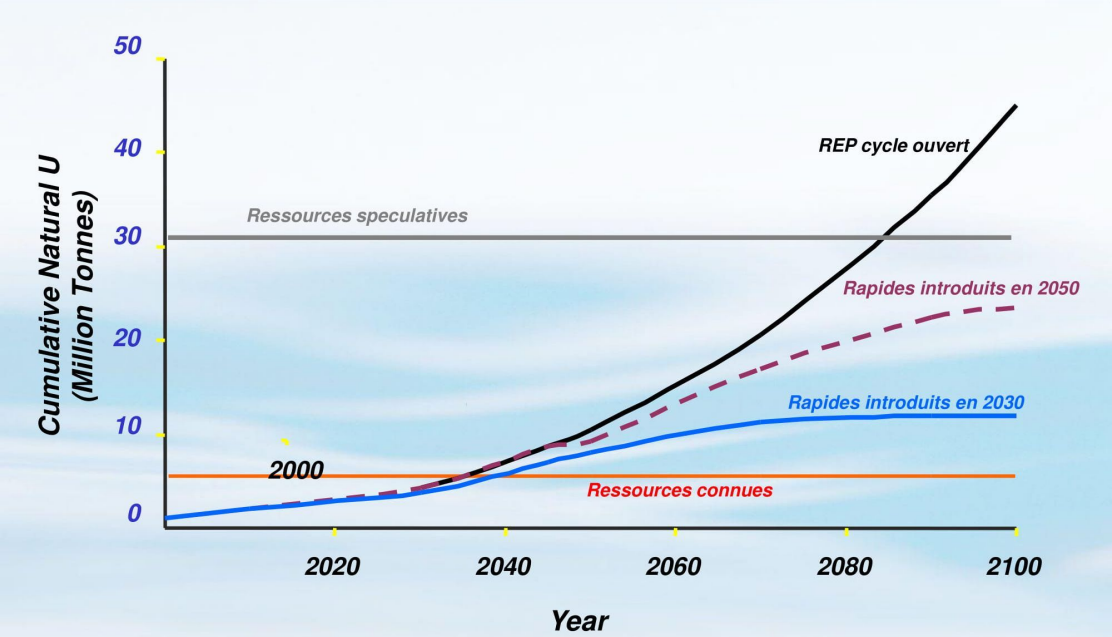
Il y a évidemment la question des ressources, puisqu'il y a un inventaire de départ d'uranium sur Terre, de la même façon qu'il y a un inventaire de départ de minerai de cuivre, de diamants, de platine. Donc la question est : combien il y en a ? Alors, comme pour tout métal, « combien il y en a » dépend de la quantité de ressources énergétiques, et donc de ressources économiques, que vous êtes prêt à mettre dans l'extraction de ce métal, puisque vous avez des dépôts plus ou moins riches ; et comme je le disais, si vous avez une énergie infinie, il y a de l'uranium sous le sol de l'école des Mines. Je peux y aller et l'extraire. Donc une ressource minière est toujours : quelle quantité pour quels moyens mis en face.

Et alors, on a coutume d'assimiler les moyens mis en face au prix payé. On a coutume de tout ramener à des euros en disant que c'est comme ça qu'on a le meilleur proxy. Donc ce que vous dit ce graphique, c'est, quelque part, que vous avez dans les métaux quelque chose qui ressemble à ce que vous avez dans le pétrole, avec du 1p, 2p et 3p.

42. ON JOUE AU PETIT JEU DES RÉSERVES ?

Et ce que vous devez retenir comme ordre de grandeur, c'est que, si on va racler tous les fonds de tiroirs qu'on peut trouver à droite et à gauche, on a de l'ordre de quelques dizaines de millions de tonnes d'uranium disponibles sur Terre, ou accessibles sur Terre. Vous en avez aujourd'hui que l'on n'exploite pas. Par exemple, il y en a dans les phosphates. Vous en avez dans l'eau de mer – dans l'eau de mer, on peut le récupérer avec des polymères qu'on laisse tremper, etc. Donc vous en avez quelques dizaines de millions de tonnes.

43. On joue au petit jeu des exponentielles ?



« Durabilité » des réserves d'U si le nucléaire se développe.
Source CEA

Diapositive 44.

Alors quelques dizaines de millions de tonnes, est-ce que c'est suffisant pour qu'on colle des centrales nucléaires partout et qu'on soit débarrassé des problèmes à la fois de disponibilité des combustibles fossiles et du changement climatique ? Finalement, c'est ça la règle de 3 qu'il est intéressant de faire. Alors la réponse est : « oui et non ».

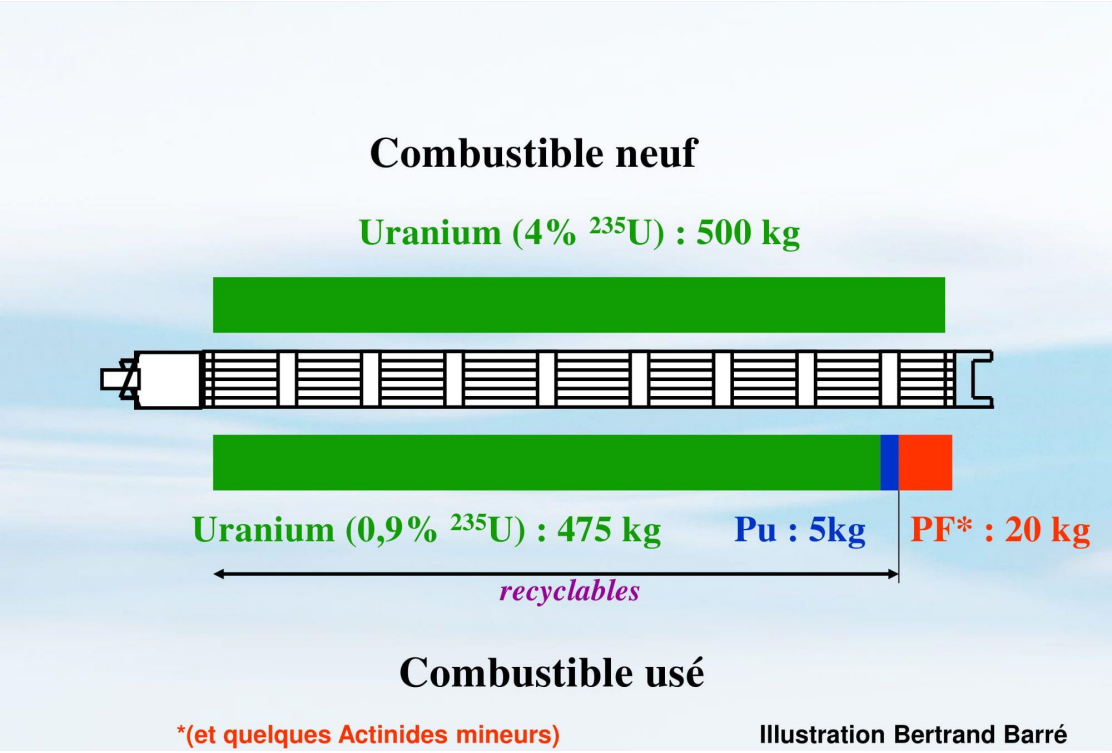
C'est-à-dire que si on considère que l'on reste sur les réacteurs à uranium 235 comme aujourd'hui. Eh bien, si vous les augmentez de 5 ou 10% par an pour faire face aux problèmes que j'ai évoqués, dûs aux combustibles fossiles, avant la fin du 21e siècle, vous avez quand même un problème de ressources.

Par contre, si vous utilisez le parc de réacteurs actuels pour démarrer des réacteurs de génération 4, en passant en cycle fermé sur le combustible, là vous y arrivez. C'est-à-dire que la ressource n'est plus un sujet majeur. Donc en gros, le sujet central pour un nucléaire « durable » au sens de « ça doit contribuer significativement aux problèmes évoqués précédemment », c'est de passer à la génération 4, qui exploite l'essentiel de l'uranium, ou qui exploite le thorium,

qui est quatre fois plus abondant que l'uranium. Et à ce moment, la densité énergétique du matériau est telle, dans la fission, qu'on n'a plus de problème de ressources d'ici à ce que l'humanité s'éteigne. Parce qu'au fond, on finira par mourir de quelque chose. Voilà ce que vous dit en gros ce graphique.

∗∗∗ Question auditoire ∗∗∗
« Est ce qu'il y a d'autres utilisations de l'uranium à part pour le nucléaire ? »
Non, je vous dis, à part l'uranium appauvri qui a servi à faire des quilles de bateaux et des flèches anti-char. Mais sinon non, il n'y en a pas tellement d'autres : ce n'est pas décoratif, ça ne sent pas spécialement bon, on n'en fait pas d'œuvres d'art… C'est une bonne question, cela étant, ça aurait pu servir à autre chose.

44. Combustible, mais ne se consume pas !



Diapositive 45.

Après, on a un sujet en ce qui concerne le traitement à l'aval du cycle, c'est-à-dire les déchets.

Donc j'ai utilisé le terme combustible jusqu'à maintenant, mais il faut bien voir que « combustible », en fait c'est un terme impropre puisque ça ne brûle pas, ça fissionne. Alors au chargement du réacteur, j'utilise donc de l'uranium à 3 ou 4% d'uranium 235 que je sors au bout de quelques années. Alors, j'ai encore de l'uranium, mais beaucoup moins, et ce que vous voyez, c'est que la fraction d'uranium 235 a considérablement baissé, mais il en reste encore.

J'ai créé du plutonium. Alors, une partie de ce plutonium est fissile, il s'agit du plutonium 239 et du plutonium 241. Une autre partie n'est pas fissile, il s'agit du plutonium 240, voire le 242. On retrouve ces différents isotopes du plutonium dans les barres de combustible usé en sortie de centrale. Or, il se trouve que le plutonium qui sert à faire les bombes, c'est le plutonium 239, à l'exclusion de tous les autres. Alors, le plutonium que je sors en retraitement d'une centrale nucléaire française est totalement impropre à faire une bombe.

Pour pouvoir faire des bombes, il faut que le plutonium vienne d'un assemblage qui soit resté simplement quelques mois dans le cœur du réacteur.

C'est pour ça que les centrales plutonigènes qui permettent de faire des bombes, sont des centrales dites « à déchargement en continu ». C'est-à-dire que, dans ces centrales, vous pouvez charger / décharger du combustible en cours de fonctionnement. Et, soit dit en passant, Tchernobyl, était une centrale de ce type, et c'est pour cette raison qu'il y avait des particularités dans le fonctionnement et le dessin de cette centrale, qui la rendait, par ailleurs, beaucoup plus dangereuse que les centrales françaises. C'est parce qu'elle avait cet usage-là, de fabrication de plutonium qu'elle avait la possibilité d'être chargée et déchargée en continu.

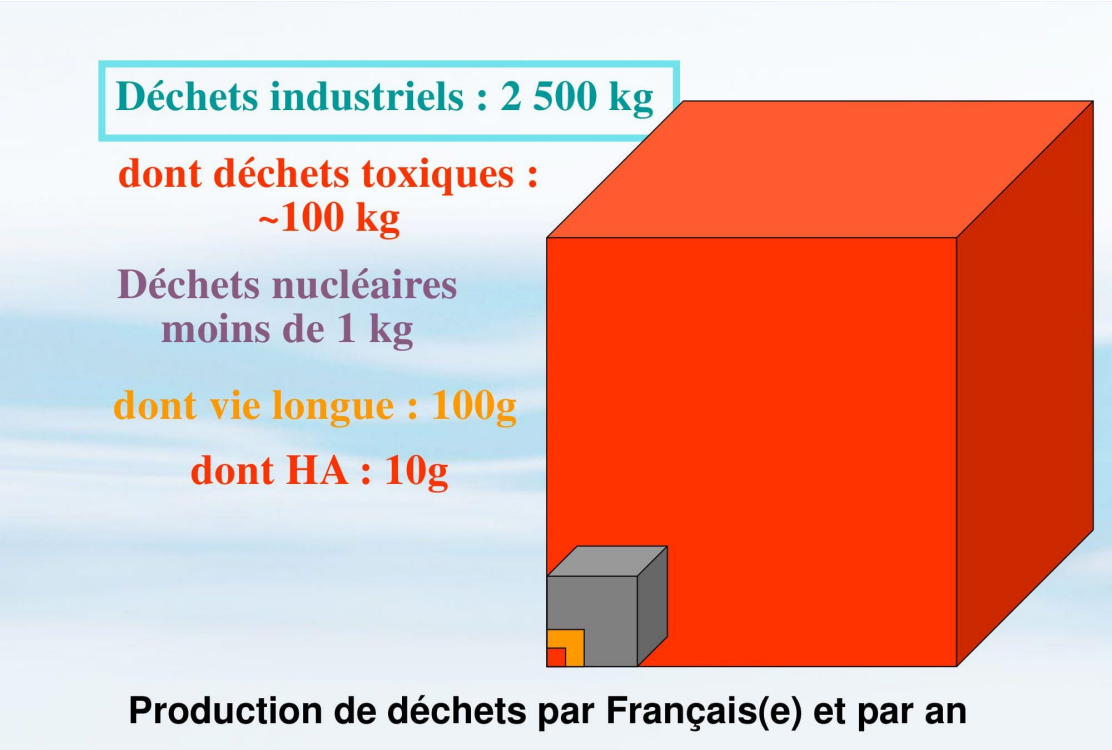
Les produits de fission, c'est-à-dire les éléments qui sont centrés autour des numéros atomiques 30 et 60, n'ont pas disparu dans le cœur du réacteur.

Alors concernant ces produits de fission et globalement concernant les déchets nucléaires, il est intéressant de les comparer à l'ensemble des déchets que produisent les Hommes. Parce qu'il n'y a pas que le nucléaire qui produit des déchets. Pour fabriquer le T-shirt ou la robe que vous portez, il a fallu produire des déchets aussi, des déchets industriels. Pour faire vos lunettes, il a fallu faire des déchets, et pour faire vos chaussures, il a fallu faire des déchets, et pour faire l'école des Mines, il a fallu faire des déchets, d'accord ? Même si c'était il y a longtemps. Donc la prochaine fois qu'on changera le faux plafond, il faudra faire des déchets. Donc, on fait des déchets pour absolument tout, dans notre activité, et la question c'est : « Est-ce qu'on en fait plus ou moins avec ça ? »

Par personne – je dis bien par personne –, en France, 2,5 tonnes de déchets industriels sont générés par personne et par an. Vous ne les voyez pas évidemment, ils ne sont pas chez nous.

*** Question auditoire ***
Question sur la conservation de la masse.
À cause de $E = mc^2$. L'énergie qui a été libérée par la fission correspond à un défaut de masse. Le défaut de masse n'est pas de zéro, sinon il y aurait zéro énergie. Bon, $E = mc^2$, si $m = 0$, c^2 a beau être très, très grand, E est quand même égal à zéro. Donc, c'est le défaut de masse, la différence entre les deux.

45. Les déchets, quelques ordres de grandeur



Diapositive 46.

Donc les déchets industriels qui sont générés chaque année en France, correspondent à *2,5 tonnes* par personne et par an. C'est la contrepartie, encore une fois, de la fabrication de tous les objets que vous achetez au cours d'une année. Là-dedans, il y a environ 100 kg de déchets toxiques qui doivent être traités par des filières spéciales.

Les déchets nucléaires, par personne, tous types de déchets confondus, c'est moins de 1 kg par personne et par an. Et là-dedans, ceux qui sont vraiment gênants, donc ceux qu'on va aller stocker à Cigéo, à Bure, dans la Meuse, ceux-là, ça représente *quelques grammes* par français et par an. D'accord ? Donc c'est l'équivalent d'une ou deux pièces de deux euros, par français et par an.

46. Les déchets, quelques ordres de grandeur (bis)

Catégorie de déchets	Production totale (part française)
TFA (hors résidus miniers)	1 à 2 000 000 m^3
FMA – vie courte	1 300 000 m^3 (stockés)
FMA – vie courte - Déchets tritiés	3 500 m^3
FA – vie longue - Graphites	14 000 m^3
FA – vie longue - Radifères	> 100 000 m^3
MA – vie longue	60 000 m^3
HA - Produits de fission vitrifiés	5 000 m^3

Volumes de déchets pour 40 ans d'exploitation du parc actuel.
Source ANDRA

Diapositive 47.

Donc, dit d'une autre manière, 40 ans d'activités nucléaires auront généré quelques milliers de mètres cubes de déchets gênants. Ou encore, cela génère l'équivalent par an du volume d'un appartement de trois pièces. D'accord ? Donc la production totale de déchets vraiment gênants, les déchets à haute activité et à longue durée de vie, cela représente l'équivalent d'un appartement de 3 pièces, de 200 mètres cubes par an pour toute la France. D'accord ? 200 mètres cubes, c'est l'ordre de grandeur. Ça tient largement dans le volume de cet amphi, d'accord ? Donc, la production annuelle de déchets nucléaires vraiment gênant en France, c'est le volume de cette pièce.

*** Question auditoire ***
« Par personne ? »
Non pour la totalité de la France. 200 mètres cubes par personne ça ferait beaucoup. Donc ce sont des déchets vraiment embêtants, mais cela ne représente pas des gros volumes.

47. Un exemple de poubelle



Diapositive 48.

Alors, où sont-ils stockés, ces déchets nucléaires ? Ça dépend de leur radiotoxicité. Donc, pour ceux qui ne sont pas très radioactifs, voilà le genre de trucs qu'on fait. On fait comme des abeilles à l'envers. On fait des alvéoles, et on vient insérer les déchets là-dedans. Dans les déchets de faible activité figurent par exemple les combinaisons qui ont été utilisées par les opérateurs qui travaillent à la Hague. Voilà, ça c'est un exemple de déchets de faible activité. Vous avez également des résidus de traitement.

Là, dans le combustible usé, en revanche, vous n'avez pas de déchets de faible activité. Ça repart dans le cycle du combustible. Ça également. Et ça, ça va directement en colis vitrifiés. D'accord ? Donc les déchets de faible et moyenne activité, ils ne viennent pas de là. Ils viennent d'ailleurs. Donc voilà le genre de stockage qu'on a. Et puis, une fois que ces trucs-là sont refermés, on met un gros tas de terre par-dessus, et on n'en parle plus.

47. UN EXEMPLE DE POUBELLE

∗∗∗ Question auditoire ∗∗∗
« Et les barils qui sont dans la Manche ? »
Qui baignent dans la Manche ? Sûrement pas au titre des activités actuelles. Il y a eu des déchets immergés en mer, je ne sais plus exactement lesquels, mais cela fait au moins 40 ans que c'est arrêté.

48. Et une poubelle naturelle !



Diapositive 49.

Là, je vous présente le plus vieux site de stockage de déchets au monde. Quel âge a-t-il ? Il a deux milliards d'années, absolument. Vous avez ici la mine d'Oklo, au Gabon, dans laquelle a fonctionné naturellement une réaction nucléaire. Donc les Hommes n'ont même pas inventé ça. Oui, les brillants ingénieurs des Mines n'ont même pas inventé l'énergie nucléaire, c'est quand même ballot. L'énergie nucléaire a été inventée toute seule par la nature il y a deux milliards d'années, dans des réacteurs naturels, dont vous avez eu un exemplaire dans cette mine d'uranium.

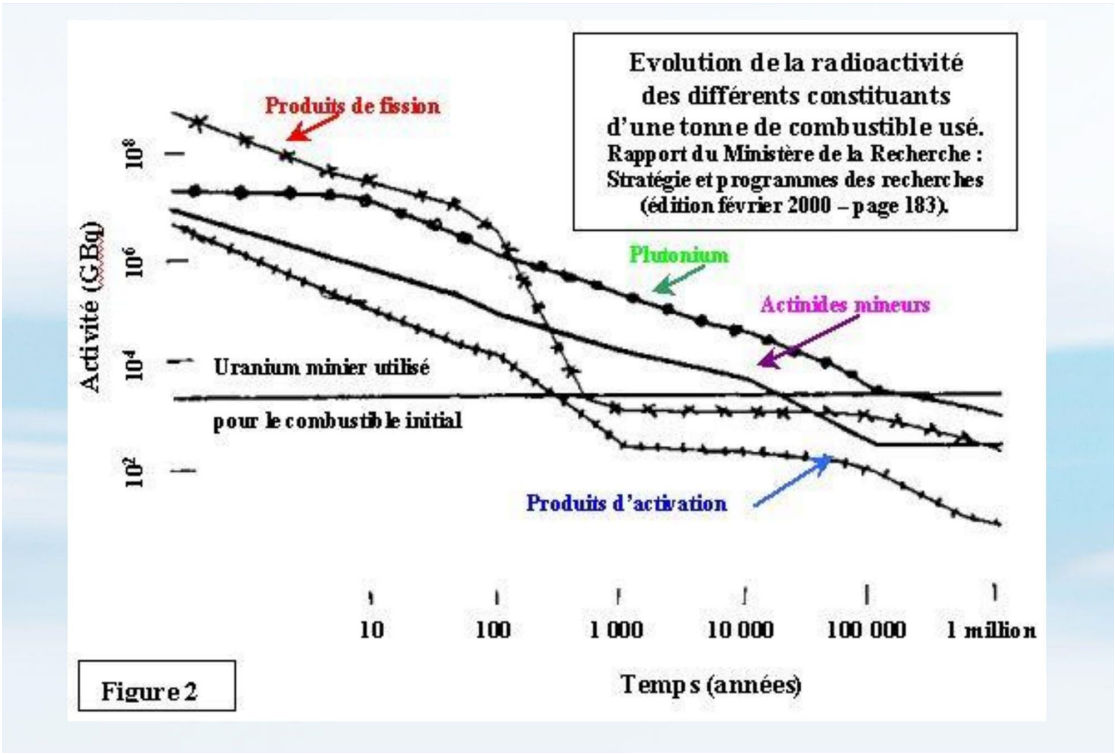
Alors, je vous la fais très rapide : il y a deux milliards d'années, comme la demi-vie de l'uranium 235 est de 700-800 millions d'années, la teneur en uranium 235 dans l'uranium naturel est d'environ 3-5%. Ça tombe bien, c'est comme dans les réacteurs à uranium enrichi d'aujourd'hui. Et dans cette mine, vous avez des infiltrations d'eau. Donc vous avez le modérateur qui arrive spontanément par-dessus. Donc vous avez de l'uranium enrichi et le modérateur : crac ! La réaction de fission se met en route.

48. ET UNE POUBELLE NATURELLE !

Alors évidemment, une fois que la réaction de fission s'est mise en route, ça chauffe, du coup ça vaporise l'eau. Du coup il y a plus de modérateur, du coup ça s'arrête. Du coup l'eau revient, du coup ça repart, etc. Et donc vous avez un réacteur pulsé comme ça, qui a fonctionné pendant des centaines de milliers d'années, je dis bien des centaines de milliers d'années, et il a fait des déchets.

Il a fait des produits de fission, donc il a fait des déchets. Question : « Où sont passés les déchets ? » La réponse, c'est : « Ils sont restés exactement là où ils ont été créés, depuis 2 milliards d'années. » Donc c'est intéressant, vous voyez. Un site dont on s'est foutu, on n'a pas fait de débat national sur les déchets, rien. La nature a fait les choses n'importe comment, elle a foutu ça partout, là, comme dans votre chambre ; c'est dégueulasse, et il ne s'est rien passé de spécial, c'est-à-dire que les déchets sont restés très exactement à l'endroit où ils ont été créés.

49. Le déchet nucléaire ne le reste pas indéfiniment



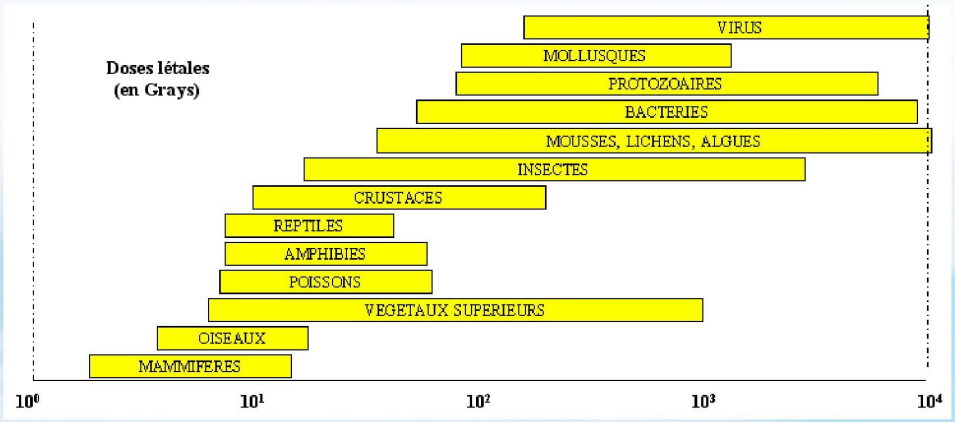
Diapositive 50.

Alors heureusement les déchets que l'on crée, nous, ils ne vont pas attendre 2 milliards d'années. Vous voyez ici la vitesse de décroissance radioactive des divers types de produits que nous avons en sortie de réacteur, et en fait comme les déchets de fission crachent énormément de radioactivité, par contrecoup leur demi-vie n'est pas extrêmement élevée.

Donc vous voyez, là, vous avez l'activité de l'uranium initial, qui se manipule à mains nues. Vous voyez que les produits de fission ne vont pas durer 100 000 ans, et qu'au bout de quelques siècles, ils sont devenus inoffensifs.

Ce qui va durer longtemps, c'est le plutonium et les actinides mineurs. Ici, le plutonium étant recyclé, en fait le deuxième enjeu si l'on veut vraiment être totalement débarrassé de tous les emmerdements – bien que ça ne soit pas un gros emmerdement – c'est de faire des réacteurs de génération 4, dans lesquels, le plutonium et les actinides brûlent dans le réacteur, et où, donc, on ne sort pas ce genre de trucs du réacteur. On ne sort que les produits d'activation et de fission, qui vont durer quelques siècles, ce qui n'est quand même pas un problème majeur, puisque le pont du Gard est beaucoup plus vieux.

50. L'égalité n'existe pas plus devant la radioactivité



Doses mortelles pour diverses catégories d'être vivants.
Source UNSCEAR
NB : 1 Gray = 1 joule par kg d'énergie transmise par le rayonnement

Diapositive 51.

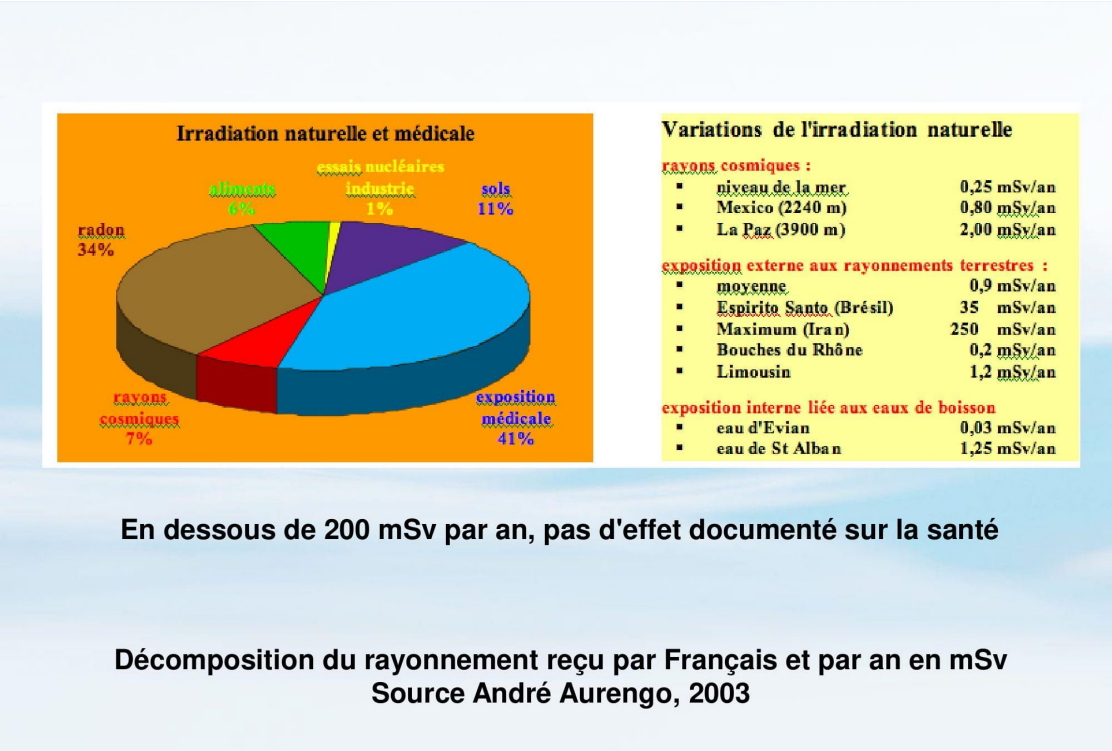
Par ailleurs, très rapidement, tous les êtres vivants sont exposés à la radioactivité, depuis qu'il y a de la vie sur Terre. Alors, est-ce que vous savez quel est l'élément qui va le plus agresser vos cellules et qui va briser l'ADN de chacune de vos cellules, des centaines de fois par jour ? Pas le soleil, non. Un truc qui vous rentre par les narines plusieurs fois par minute ? L'oxygène !

L'oxygène est un oxydant, vous vous rappelez de ça ? Et donc, comme l'oxygène est un oxydant, ça vous fait des radicaux libres qui se baladent dans votre corps et qui vont briser les brins d'ADN de chacune de vos cellules, des centaines de fois par jour. Et ça ne vous empêche pas de rester vivant. Ça ne vous empêche pas de rester vivant, parce que, comme la vie est apparue sur Terre dans un monde hostile, soumis aux bombardements cosmiques, aux rayonnements ultraviolets du soleil, etc., l'ADN, plusieurs dizaines de pourcents du codage de l'ADN sont en fait du codage d'auto-réparation de l'ADN.

Donc, l'ADN, des centaines de fois par jour aussi, s'auto-répare. De temps en temps, le truc part en vrille, et à ce moment vous avez une tumeur, voilà, mais même quand vous avez une tumeur, l'essentiel du temps c'est une tumeur bénigne, ou bien la cellule meurt. C'est un phénomène qui s'appelle l'apoptose et la cellule meurt.

Dans le monde du vivant, il ne faut donc pas croire que les cellules sont sans défense face aux agressions. En fait, elles ont une panoplie de défense. La radioactivité, c'est un des trucs qui peut agresser l'ADN, mais ce n'est pas le seul, loin s'en faut. Donc tous les êtres vivants sont soumis aux rayonnements ionisants. Ils ne sont pas tous également vulnérables aux rayonnements ionisants, comme vous pouvez le voir ici, je n'ai pas le temps d'entrer dans le détail.

51. Nous sommes tous irradiés, c'est juste une question de dose



Diapositive 52.

Les Hommes sont exposés à de la radioactivité. Ils sont exposés à la radioactivité naturelle à cause du bombardement cosmique – le rayonnement cosmique, c'est de la radioactivité naturelle –, à cause de la radioactivité naturelle des roches, à cause du radon, etc.

Pour vous, la première cause ou la première source est vraisemblablement : les expositions médicales. Enfin, pour les populations occidentales, c'est les expositions médicales. Donc, vous passez un scanner, vous passez une radio des poumons, et – ce que je ne souhaite à aucune des femmes dans cette salle, malheureusement les statistiques sont contre vous – si un jour vous faites traiter un cancer du poumon, je peux vous assurer qu'on vous irradiera copieusement, mais en l'occurrence pour vous sauver la vie – en tout cas c'est ce que pense le médecin, et il n'a pas tort. Voilà. Donc la première source d'irradiation, et de très loin, c'est l'irradiation d'origine médicale.

52. Est-ce Tchernobyl ?



Diapositive 53.

Alors, petite photo-choc. Est-ce que ça, c'est Tchernobyl ? Eh bien la réponse est non. Ça, c'est du rachitisme, conjugué à une déficience en fluor. Alors, je vous montre ça pour choquer un tout petit peu par l'image, parce qu'il n'y a rien de plus facile que de détourner une image. Je peux vous assurer que je prends n'importe quel journaliste de France 3, et je lui dis « ça, c'est Tchernobyl », il le passe direct au 20h. Très, très facile. Rien de plus facile, je l'ai déjà vu, donc c'est pour ça que je vous le dis. Voilà.

Donc ce n'est pas parce qu'il y a quelque chose qui va de travers que c'est nécessairement Tchernobyl. Alors revenons aux conséquences radiologiques du nucléaire, et par exemple aux retombées de Tchernobyl. Dans la population qui a subi les retombées de Tchernobyl, vous avez de toute façon des gens qui meurent. Vous avez de toute façon des gens qui meurent de cancer. Il y avait des gens qui mouraient de cancer avant Tchernobyl.

Donc, pour savoir si Tchernobyl, ou toute autre exposition aux rayonnements ionisants, provoque un surplus d'une pathologie quelconque, il faut faire ce qu'on appelle des études de cohorte.

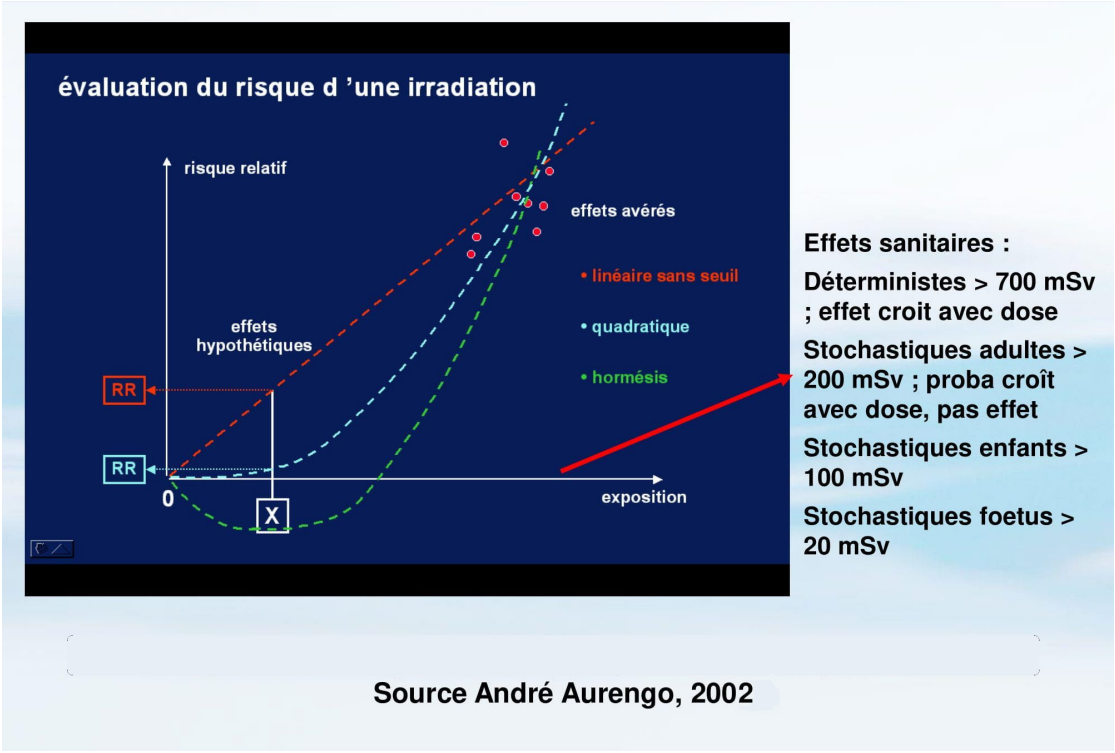
C'est exactement comme ça qu'on procède pour le tabac. Donc pour savoir que le tabac c'est mauvais, on prend 10 000 personnes qui fument, et 10 000 personnes qui sont décomposées exactement de la même manière par sexe, par âge, par lieu de résidence, par habitudes alimentaires, etc., tout égal sauf qu'ils ne fument pas. Et puis on regarde, au cours du temps, comment les deux se comportent. Et si ceux qui fument, manifestement, ont plus d'un certain nombre d'emmerdements au cours du temps, des maladies cardiovasculaires, des cancers, etc., que ceux qui ne fument pas, on dit : « C'est la faute au tabac. »

Et donc c'est comme ça qu'on sait que le tabac provoque plus d'accidents cardiovasculaires – première source de surmortalité due au tabac. Des cancers du poumon, mais pas que. Les cancers de la vessie, par exemple, augmentent avec le tabac. Donc vous avez un certain nombre de trucs, et on sait que c'est ça, avec ce qu'on appelle les études de cohorte.

Eh bien, pour le nucléaire, on procède exactement de la même manière, c'est-à-dire que vous faites des cohortes, et vous comparez des gens qui ont été exposés avec des gens qui ne l'ont pas été. La difficulté avec le nucléaire, c'est qu'avec le tabac, vous savez combien les gens fument. Ils vont chez le tabagiste, enfin, chez le buraliste, et ils achètent des paquets de cigarettes.

Pour la radioactivité, sauf si vous avez un dosimètre sur vous, vous ne savez pas combien vous êtes exposés à la radioactivité. Donc la difficulté supplémentaire, c'est qu'il faut reconstituer cette exposition à la radioactivité, pour savoir quelles sont ses conséquences possibles dans la population que vous avez sélectionnée. D'accord ? Tant que vous ne savez pas ça, vous ne pouvez pas tirer de conclusions.

53. La relation linéaire dose-effet sans seuil, commode mais faux



Diapositive 54.

Alors, les conclusions qui ont été tirées des études épidémiologiques, elles vous disent, en gros, deux choses, pour aller très vite aux résultats en dessous.

Pardon, il y a aussi un truc qu'il faut savoir, mais je suis désolé, je n'ai pas le temps de vous le définir, et de toute façon, même si j'avais le temps, vous n'y comprendriez rien, parce que moi non plus. Vous avez une unité qui est essentielle en ce qui concerne l'impact des rayonnements ionisants, qui s'appelle le *sievert* et son sous-multiple qui est le *millisievert*. Donc vous avez peut-être déjà vu ce truc-là, noté Sv ou mSv.

Alors, soit dit en passant, je ne pense pas qu'il y ait un anti-nucléaire vous parlant de millisieverts, qui sache définir ce que c'est qu'un millisievert, parce que la définition fait à peu près cinq pages. Le millisievert est une unité dérivée du gray. Le gray est une unité d'énergie transférée par le rayonnement à la matière, et qui vaut un joule par kilo de poids. D'accord ? Donc quand vous

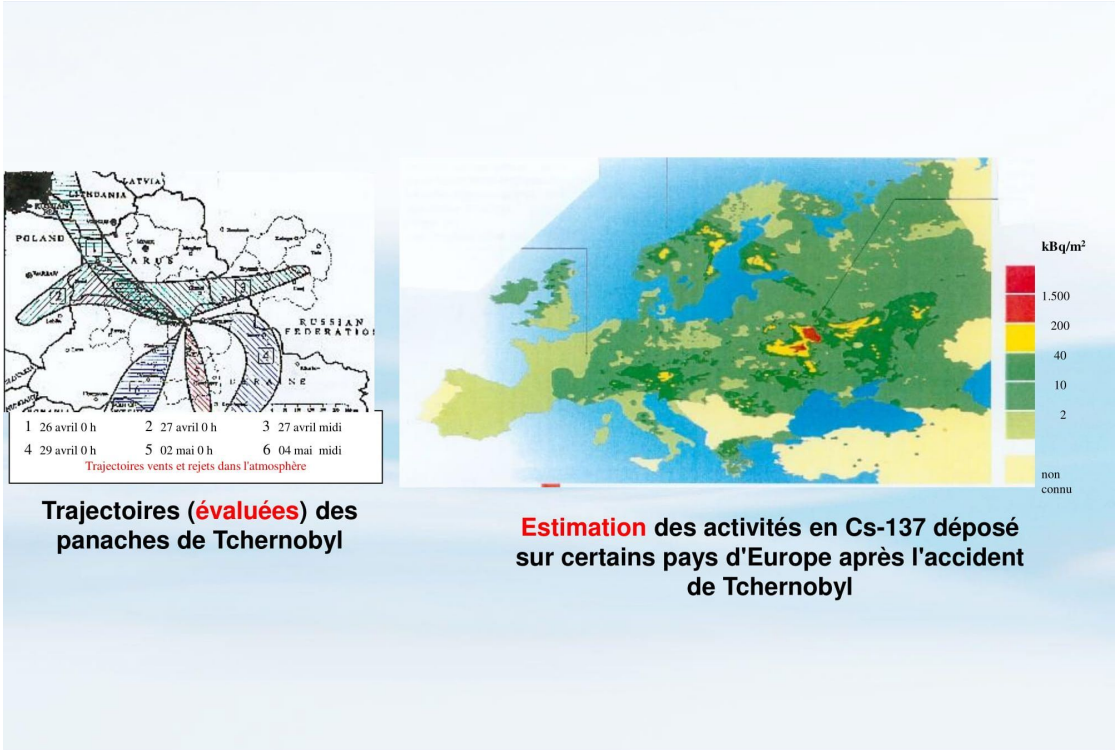
avez reçu un gray, c'est que le rayonnement vous a transféré un joule par kilo de poids. Une irradiation du cancer du sein typique, c'est 50 gray. 50 joules par kilo de poids sur trois mois. Vous voyez, ce n'est pas une très grande unité.

Le sievert, c'est un gray multiplé par un facteur qui dépend du type de rayonnement – donc le facteur multiplicatif c'est 20 pour les neutrons, mais par exemple 1 pour le bêta –, qui dépend du type d'organe considéré, qui dépend du fait que c'est une exposition externe ou interne, etc., bref c'est l'encyclopédie, votre truc. Mais c'est ça l'unité de dose reçue qu'on utilise quand on parle de la dangerosité des rayonnements ionisants.

Avec cette unité-là, en dessous de 100 mSv par an, on ne voit rien. Si vous faites des études épidémiologiques et que vous comparez des gens qui reçoivent 80 mSv et des gens qui reçoivent 10 mSv, vous ne voyez pas de différence. C'est pour ça que Thomas Pesquet prend le risque d'aller prendre 180 mSv dans l'espace, en se disant « normalement ça ne me fera rien » et il a bien raison. Et c'est pour ça que les hôtesses d'Easyjet prennent 10 mSv dans l'année, en se disant « ça ne me fera rien » et elles ont bien raison.

Au-dessus de 200 mSv, vous commencez à voir apparaître des effets qui sont proportionnels à la dose reçue. D'accord ? Donc si vous avez une population qui est exposée à 400 mSv de tel type de rayonnement, vous aurez, toutes choses égales par ailleurs, 50% d'effets en plus que si vous avez reçu 300 mSv, en supposant qu'à 200 mSv il n'y a rien. C'est ça l'idée. Ça, c'est les données d'observation.

54. Les doses ne se mesurent pas, elles se calculent



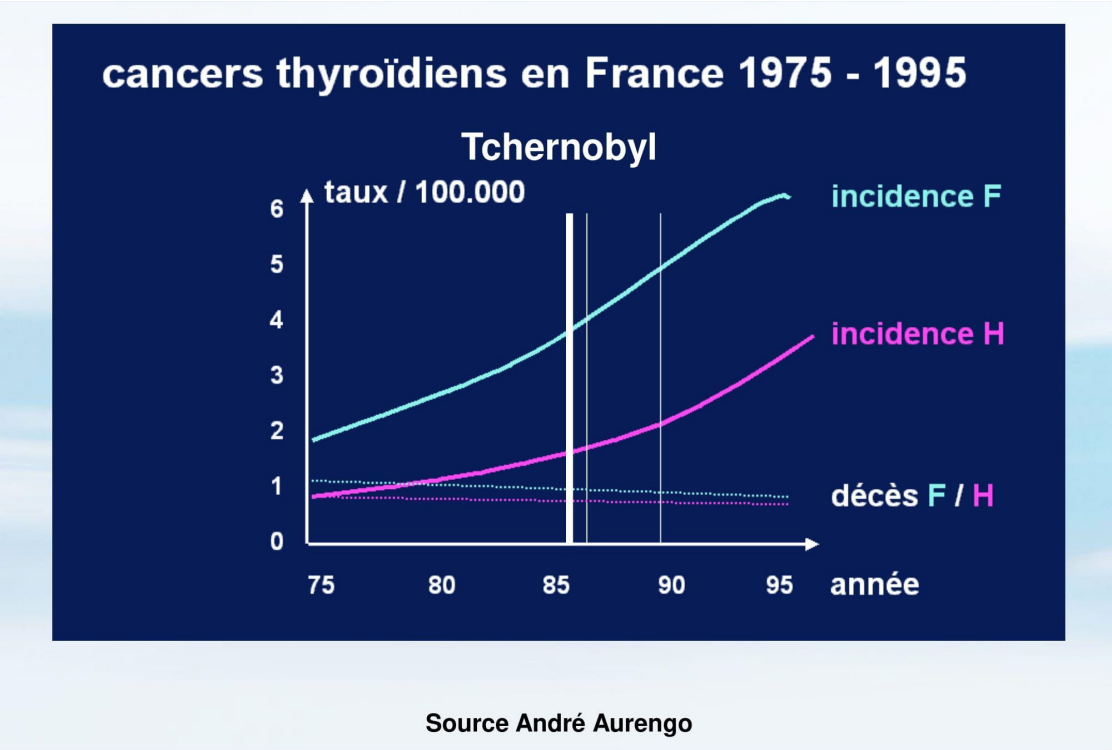
Trajectoires (évaluées) des panaches de Tchernobyl

Estimation des activités en Cs-137 déposé sur certains pays d'Europe après l'accident de Tchernobyl

Diapositive 55.

Concernant les conséquences de Tchernobyl, il faut reconstituer l'exposition reçue et le rayonnement reçu. Et comme les gens n'avaient pas de dosimètre sur eux, vous devez avoir un modèle qui vous reconstitue la circulation atmosphérique, la demi-vie des isotopes, etc., pour imaginer qui a été exposé à quoi. Plus exactement pour modéliser qui a été exposé à quoi. Ça, déjà, c'est un truc avec des incertitudes.

55. Quand les études épidémiologiques existent, quid ?



Source André Aurengo

Diapositive 56.

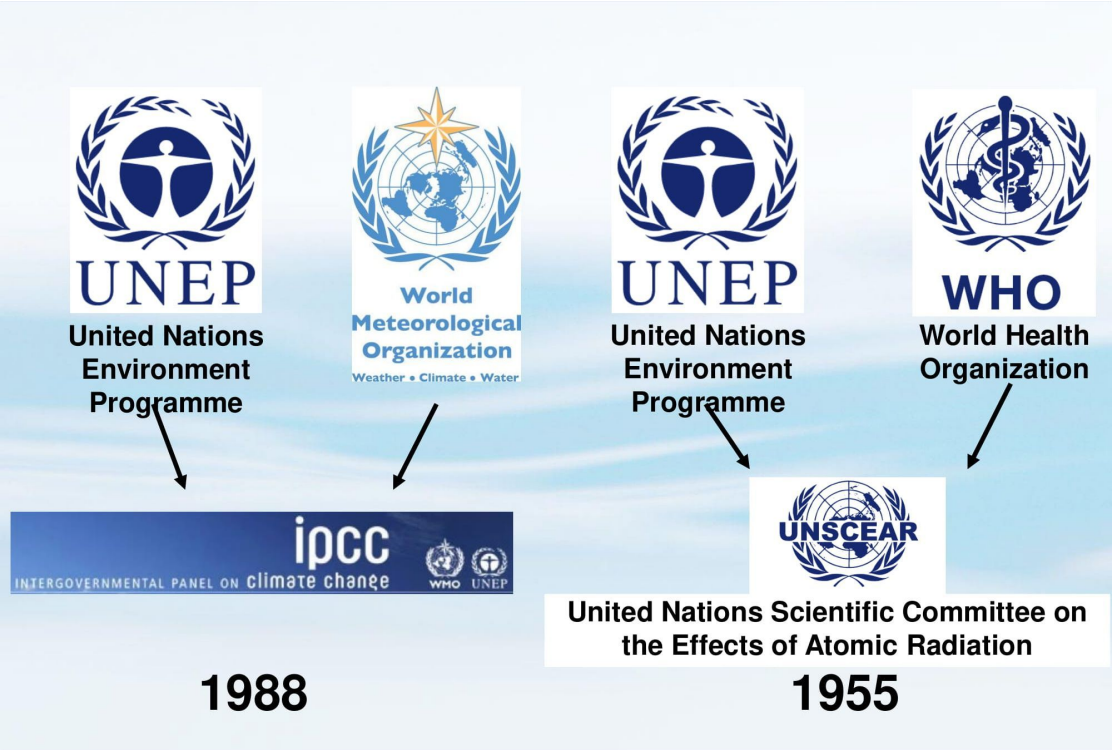
Ensuite, vous avez un certain nombre de pathologies qui existaient avant Tchernobyl. Ici par exemple, vous avez l'incidence des cancers de la thyroïde dans la population française, et Tchernobyl est là. Question : « Est-ce que vous pensez que ça a eu un effet discernable ? » Une partie des gens peuvent dire « Bah oui, ça montait, ça montait, et puis là ça aurait dû s'arrêter. » Une autre partie des gens vous disent « Non, non, en fait ce qui compte c'est la dérivée et la dérivée n'a pas changé. » Et en fait, les deuxièmes ont raison.

Il se trouve que l'on trouve plus de cancers de la thyroïde qu'avant, pour plein de raisons. D'abord parce qu'on les cherche. C'est-à-dire qu'avant vous aviez des tas de gens qui mouraient, et on n'allait pas leur ouvrir la thyroïde, donc on ne savait pas qu'il y avait des nodules. Ensuite la détection. La détection des nodules s'améliore parce que l'imagerie devient plus précise, et donc aujourd'hui vous détectez des trucs à 1 mm, alors qu'avant vous les détectiez à 1 cm. Mais c'est toujours compté comme *une* détection.

Donc vous avez tout un tas de trucs. Et puis vous avez une réelle augmentation de l'incidence qui est due à des facteurs environnementaux qu'on ne connaît pas nécessairement.

Dernier point, il faut savoir qu'à Tchernobyl, il y a eu une augmentation de l'incidence des cancers de la thyroïde chez les enfants, au moment de l'accident, mais pas chez les adultes. Parce que, quand vous êtes enfant, votre thyroïde est en train de se construire, donc vous absorbez de l'iode en quantité plus importante que quand vous êtes adulte. Donc en fait, la radioprotection à base d'iode pour saturer la thyroïde d'iode, c'est-à-dire les pastilles d'iode qu'on vous donne en cas d'accident, en fait, chez les adultes, ça ne sert à rien. Ça sert chez les enfants, mais pas chez les adultes.

56. J'aime les Nations Unies… ou pas !



Diapositive 57.

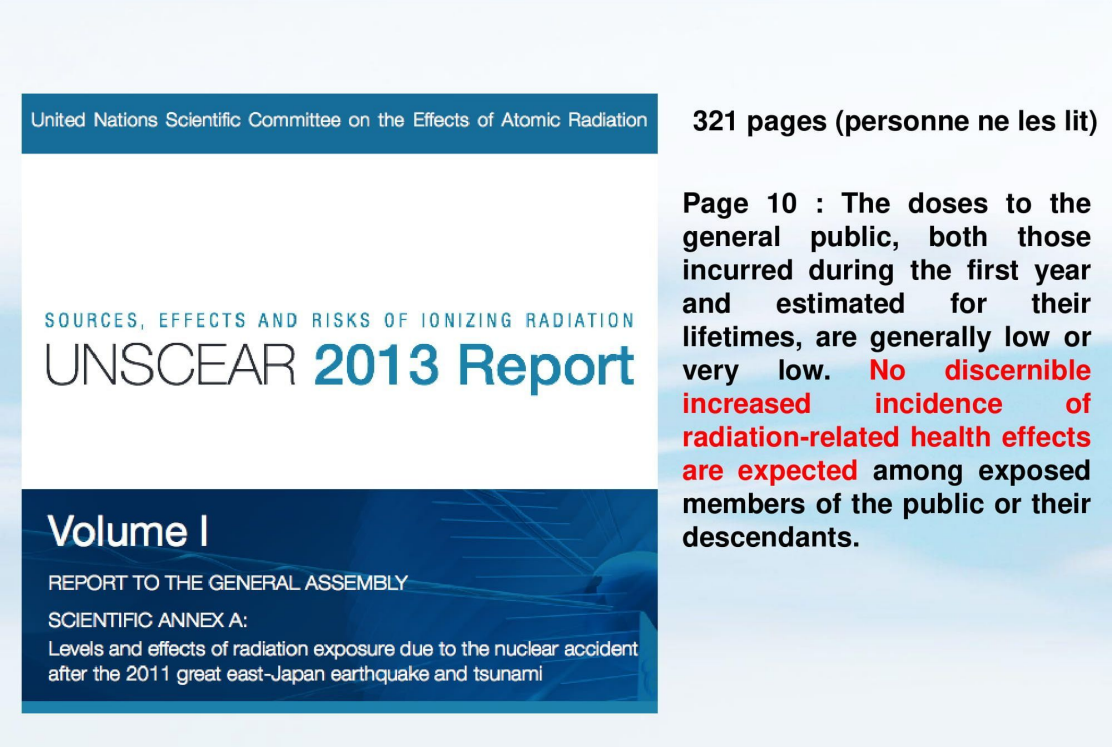
Je vais un cran plus loin. Vous avez tous, évidemment puisque vous êtes venus à ce cours sur le changement climatique, vous avez donc tous entendu parler du GIEC, IPCC en anglais. Le GIEC est une instance onusienne, qui a été créée sous la double tutelle du Programme des Nations Unies pour l'Environnement et de l'Organisation Météorologique Mondiale, et dont le mandat est de faire une compilation de la littérature scientifique disponible sur l'impact de l'Homme sur le climat.

Il se trouve qu'en 1955, il y a eu une grande sœur au GIEC, qui a été créée avec le même parent à gauche, c'est-à-dire le Programme des Nations Unies pour l'Environnement, et un autre parent à droite, qui est l'Organisation Mondiale de la Santé.

Le mandat de l'UNSCEAR est très exactement le même que celui du GIEC mais dans un autre domaine. L'UNSCEAR a pour mandat de faire une compilation de la littérature scientifique disponible sur l'impact des rayonnements

ionisants sur les êtres humains. Parce qu'on sait depuis un siècle, depuis que Marie Curie en est morte, que la radioactivité à haute dose, ce n'est pas bon.

57. Les antinucléaires, en phase avec les Nations Unies ?



Diapositive 58.

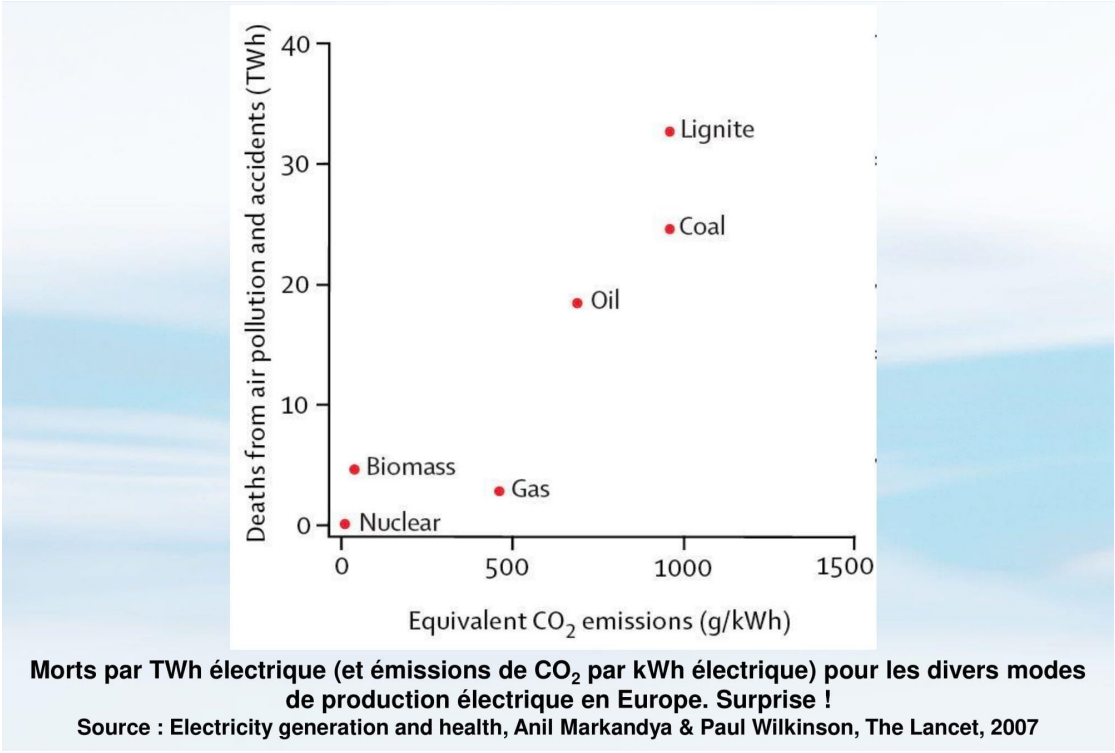
Et voilà le rapport de l'UNSCEAR sur Fukushima, sorti en 2013. C'est la phrase qui est en rouge que je vous laisse lire, parce que vous êtes tous des anglicistes distingués, et vous voyez, la conclusion des études publiées dans la littérature scientifique, en l'occurrence les revues médicales, c'est qu'il n'y a pas de conséquence radiologique sur les Hommes venant de l'accident de Fukushima. Il n'y en a pas. D'accord ?

C'est-à-dire que la reconstitution des expositions, conjuguée à ce qu'on sait sur les seuils à partir desquels on sait que c'est dangereux d'être exposé, font que l'on sait qu'il n'y aura pas de conséquences radiologiques. Il y a des conséquences à l'évacuation de la population, parce que ça a créé du stress, des gens qui se mettent à fumer, à boire, et à se suicider, ça on le sait – et même ça ce n'est pas complètement clair, mais on sait que ça a des conséquences, c'est absolument certain.

Par contre, après Fukushima, l'autorité de sûreté canadienne a décidé de restreindre le périmètre d'évacuation autour des centrales sur cette même base, en

disant : « Les morts que je vais créer en stressant les gens et en les évacuant, c'est plus, en espérance mathématique, que ceux que je vais peut-être éviter à cause des retombées radiologiques. Donc je restreins le périmètre d'évacuation. »

58. Les médecins sont-ils tous tombés sur la tête ?



Morts par TWh électrique (et émissions de CO_2 par kWh électrique) pour les divers modes de production électrique en Europe. Surprise !
Source : Electricity generation and health, Anil Markandya & Paul Wilkinson, The Lancet, 2007

Diapositive 59.

Ici vous avez un graphe qui a été publié aussi dans une revue médicale, et qui vous donne les morts par térawattheure, en ce qui concerne les diverses sources de production électrique. Et ce que vous voyez, c'est que le nucléaire, accidents compris, est le mieux placé.

Parce que le charbon, c'est 30 morts par térawattheure, parce que maladies pulmonaires des mineurs de charbon, parce que morts par accidents dans les mines, et parce que pollution urbaine. D'accord ? Donc, si vous mettez tout ça bout à bout, ça vous fait 30 morts par térawattheure, et vous voyez que le nucléaire est, médicalement, celle qui présente le moins de risques.

59. Centrales (maintenant) = bombinettes (plus tard) ?



Diapositive 60.

Après vous avez un sujet, évidemment, qui est le sujet de la bombe. Alors, le sujet de la bombe, il y a deux facteurs qui poussent dans le sens de « quand on a du nucléaire civil, c'est plus facile d'avoir la bombe ».

Le premier, c'est évidemment le corpus commun de compétences, c'est-à-dire qu'un physicien nucléaire qui sait ce qu'est une fission, n'est pas très loin d'un physicien nucléaire qui sait ce qu'est une fission dans une bombe. Cela étant, sur le plan technologique, par contre, c'est quand même des technologies qui sont assez distinctes, heureusement.

Par ailleurs, comme je l'ai expliqué tout à l'heure, la filière d'enrichissement du combustible est une filière qui est potentiellement proliférante, puisqu'il suffit de rajouter des étages, et vous passez de l'uranium qui sert dans une centrale à l'uranium qui sert dans une bombe à U235.

Il se trouve qu'en fait, les données d'observation sur ce qui s'est passé dans le monde vous montrent qu'il y a énormément de pays qui ont eu la bombe et

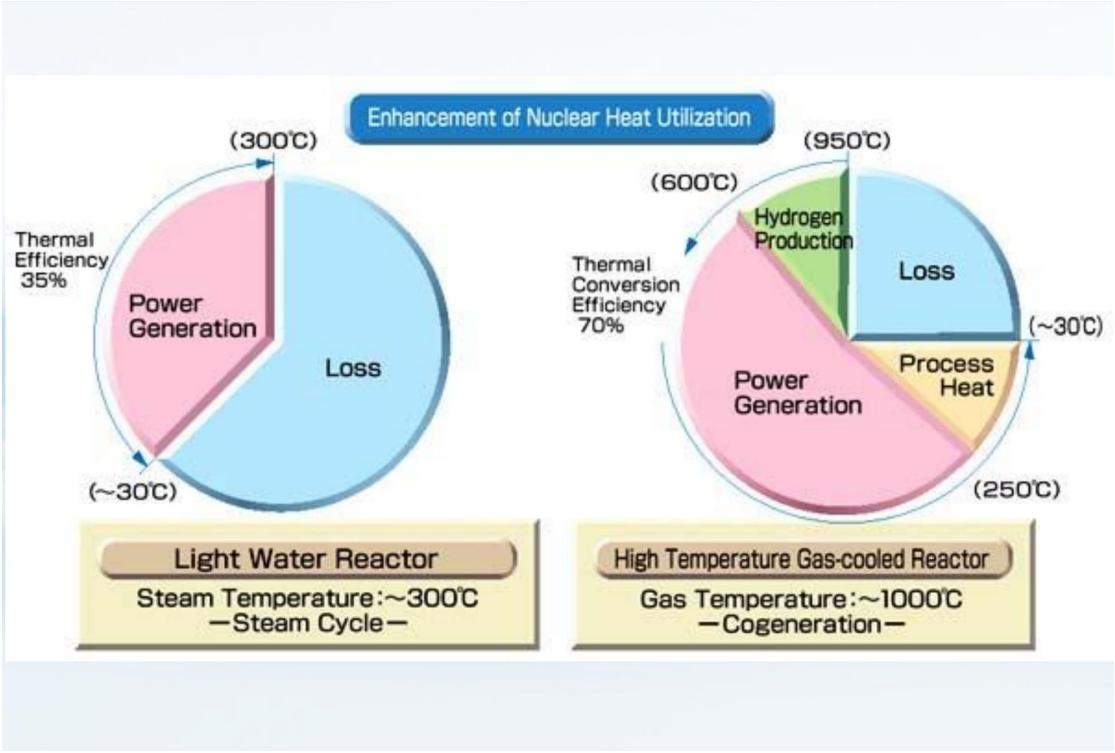
qui n'ont jamais eu la moindre centrale. Israël, par exemple, fait partie de ces pays-là. L'Afrique du Sud également. Vous avez donc un certain nombre de pays qui ont, soit eu la bombe et y ont renoncé, soit l'ont mais ne le disent pas. Mais qui n'ont jamais eu la moindre centrale, en tout cas qui, au moment où ils ont eu la bombe, n'avaient pas la moindre centrale. C'est aussi le cas des Etats-Unis et de la Russie, au moment où ils ont eu accès à l'arme atomique.

Donc, ce que vous dit l'histoire, c'est qu'en fait, la bombe vient avant tout de l'envie de l'avoir et pas avant tout du fait d'avoir des centrales civiles. Ce n'est pas le premier déterminant. Le premier déterminant, c'est que vous ayez envie de l'avoir.

Inversement, si vous décidez de décommissioner des bombes, il faut que vous sachiez quoi faire de l'uranium qu'il y a dans les bombes, et du plutonium qu'il y a dans les bombes. Un truc qui est très bien, pour être sûr que vous n'ayez plus la bombe, c'est de le cramer dans une centrale nucléaire. Comme ça, vous êtes sûr que vous l'avez plus. Si vous dites juste « je la mets dans un coin et puis je vous garantis que j'y toucherai pas », vous pouvez éventuellement vous dire que c'est peut-être une promesse d'ivrogne.

Par contre, si vous ne la mettez pas dans un coin mais dans une centrale et que vous le brûlez, là vous êtes sûrs qu'on n'y touche plus, puisqu'il n'y en a plus. Voilà, donc c'est plus compliqué qu'il n'y paraît, cette histoire entre nucléaire civil et militaire.

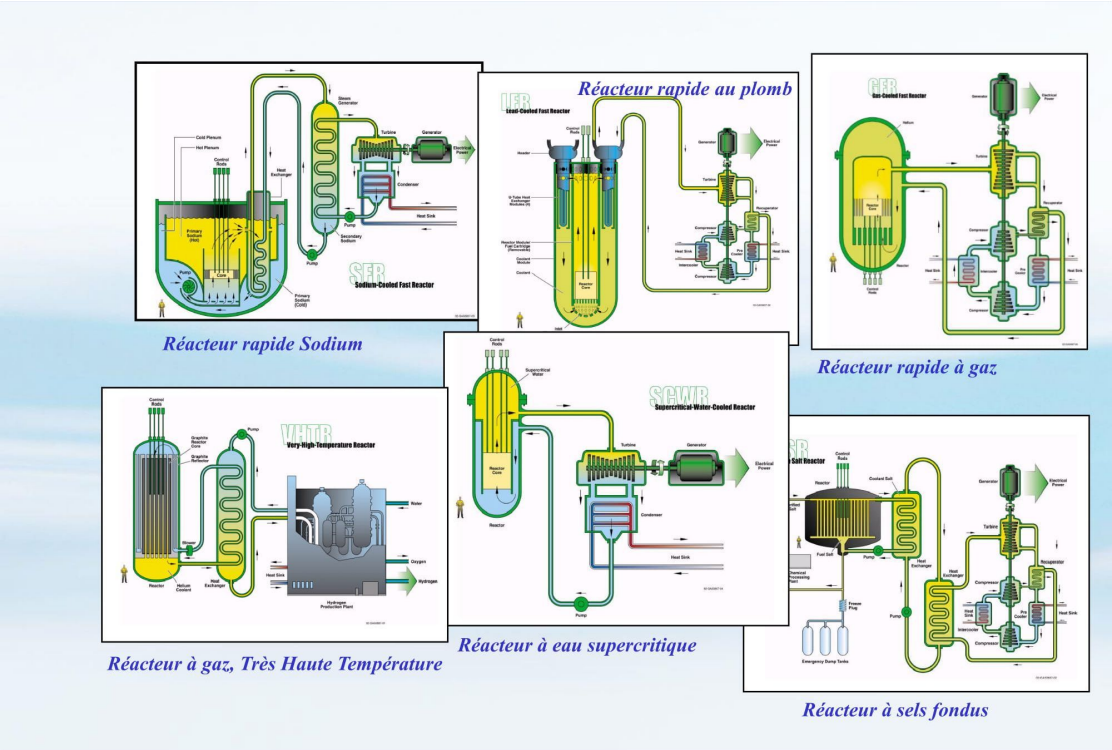
60. Peut mieux faire !



Diapositive 61.

Je vais accélérer, parce que ça je vous en ai déjà parlé.

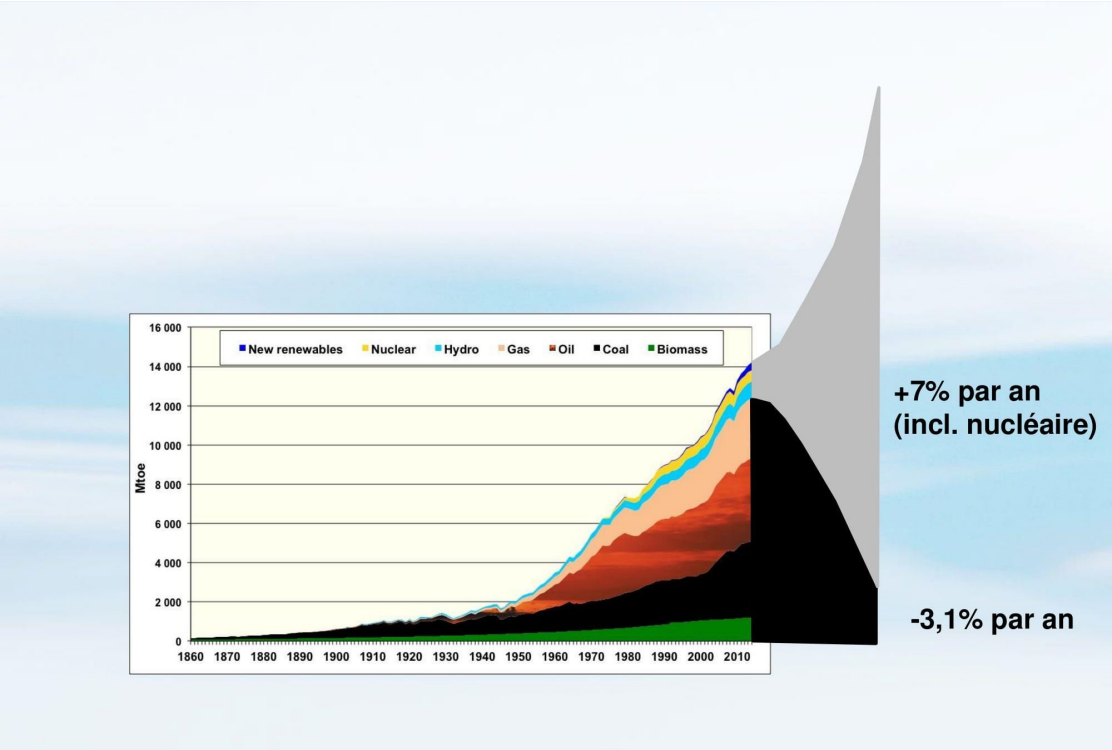
61. Les projets dans les cartons



Diapositive 62.

La génération 4, je vous en ai parlé rapidement aussi, donc j'accélère.

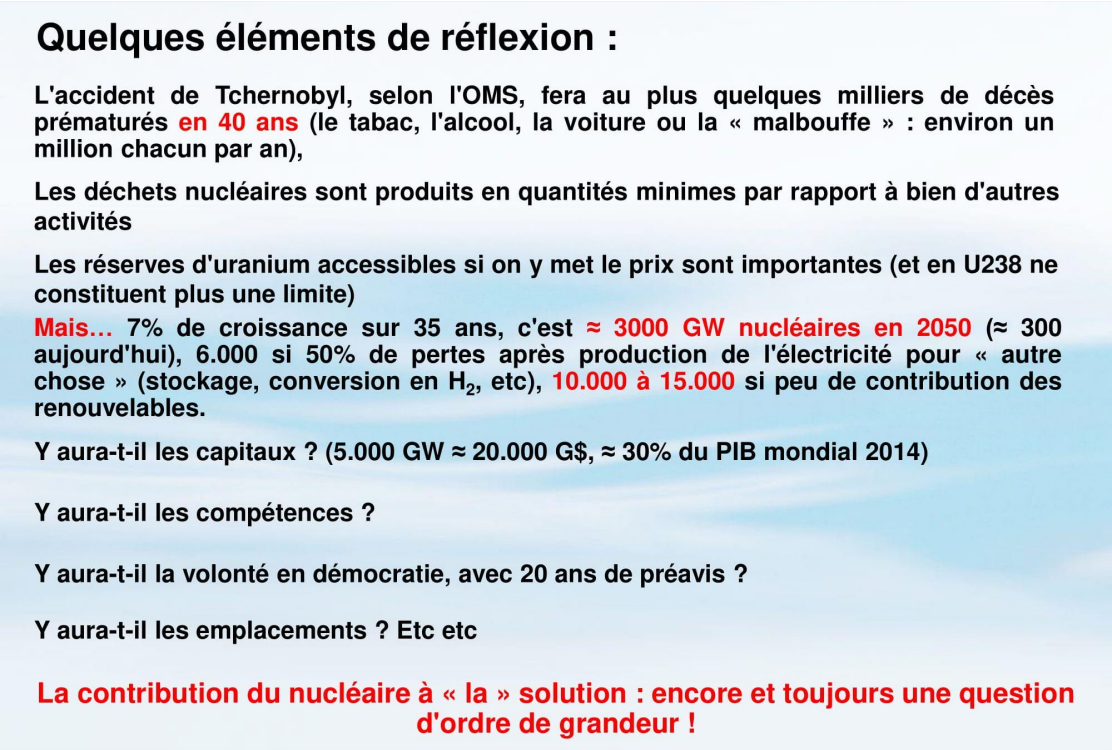
62. Rappel : le but du jeu, c'est d'essayer ça



Diapositive 63.

La question pour finir ce truc-là, c'est que si on veut que le nucléaire tienne dans le haut du graphique, c'est-à-dire qu'il soit un contributeur très significatif à la décarbonation d'une société qui ne renoncerait pas à son confort, alors il faut que le nucléaire soit capable de faire du +5-10% par an.

63. Le nucléaire peut-il faire +5% par an ?



Diapositive 64.

Là, évidemment, on tombe sur un certain nombre de questions.

Par exemple… Ça, voilà. La question, c'est : « Est-ce qu'on a la possibilité de faire en quelques dizaines d'années un parc de quelques milliers de réacteurs, sachant qu'on en a aujourd'hui 450 dans le monde ? » C'est ça la question. Donc « Est ce qu'on a l'argent ? » Parce que, comme je le disais tout à l'heure, il faut de l'argent. Alors l'argent, il y en a plein. La question, c'est « Est-ce qu'on a l'argent qui accepte d'aller s'investir là-dedans ? » C'est plutôt *ça* la question.

Donc, est-ce qu'on a soit des Etats qui disent : « C'est comme ça et on ne discute pas. » Ce qui est le cas de la Chine, soit un monde privé qui dit : « J'en ai vachement envie parce que, tout bien pesé, c'est beaucoup moins risqué que le reste. » Et à ce moment qui le fait ? Pour le moment, vous ne l'avez pas, c'est plutôt l'inverse.

L'Europe, par exemple, considère que le nucléaire, ce n'est pas vert. Donc en ce moment, il y a une réglementation qui est en train de se mettre en place à

la Commission Européenne, sur ce qu'on appelle les investissements verts dans la finance, et le nucléaire est explicitement exclu sous motif qu'il n'est pas vert. De mon point de vue, c'est une erreur, mais je ne suis qu'un électeur parmi 400 millions d'Européens.

Autre question : « Est-ce qu'il y aura les compétences ? » Parce que, dans beaucoup de sujets, si on veut changer de système de bout en bout, il faut qu'il y ait des gens qui soient capables de le faire.

Ensuite : « Est-ce qu'on saura s'y prendre suffisamment à l'avance ? » Parce qu'une centrale nucléaire, ça se construit quand même un peu moins vite qu'une hutte en paille. Donc une fois qu'on a décidé de le faire, ce n'est pas la semaine d'après que vos centrales sortent de terre. Voilà.

« Est-ce qu'on sait où les mettre ? » Alors ça, en l'occurrence, oui, parce qu'on peut les mettre à la place des centrales à charbon.

Je vais finir avec un élément que je ne vous ai pas projeté là, mais qui vient du dernier rapport 1.5 du GIEC. Dans le rapport 1.5 du GIEC, tous les scénarios d'émissions qui permettent de rester sous la barre des 1,5 °C sont des scénarios qui voient un nucléaire multiplié par un facteur 2 à 6 d'ici à 2100 (je crois). Donc, c'est tous des scénarios dans lesquels le nucléaire se développe. Evidemment, il n'y a pas que ça qui se développe, il y a aussi les énergies renouvelables et les économies d'énergie. Mais voilà.

Pour finir cet exposé par une conclusion un peu personnelle, quand on regarde les avantages et les inconvénients, donc les avantages du nucléaire et ses risques, un monde qui renonce au nucléaire est paradoxalement un monde qui accepte de courir plus de risques qu'un monde qui souhaite en faire plus. D'accord ? En termes d'arbitrage des risques.

Parce que si vous en faites moins :

— Ou bien vous augmentez l'envie de recourir à des modes fossiles qui sont potentiellement porteurs de risques que l'on a vus au moment du cours sur le changement climatique, et qui sont à des échelles qui n'ont strictement rien à voir.

— Ou bien vous prenez le pari qu'on va y arriver juste avec des renouvelables modernes, dont on parlera au prochain cours. Vous verrez que c'est un pari dont je ne suis pas complètement sûr qu'il peut réussir aussi simplement que ça, compte tenu des éléments que l'on va voir.

— Ou bien vous prenez le pari que la société va être capable de résister à une contraction rapide de son approvisionnement énergétique – puisque

vous ne faites ni fossiles ni nucléaire, et que les renouvelables ne sont pas suffisantes – tout en restant stable, compte tenu de ce qu'on a vu au premier cours sur le lien entre l'activité productive et l'énergie. D'accord ?

Donc vous avez un arbitrage entre ces trois risques. Il n'y a pas de « repas gratuit » dans cette histoire. Il y a un arbitrage entre ces trois risques, et ma conclusion personnelle, que je ne vous force pas à partager, c'est que dans cet arbitrage entre ces trois risques – c'est peut-être très paradoxal de dire ça en France, mais – plus on fait de nucléaire et moins on court de risques. Voilà. En gros.

Ça n'exclut pas du tout le fait qu'il faut faire énormément d'économies d'énergie, et qu'il y aura plein de renouvelables intéressantes dans un certain nombre de cas de figure. Mais, globalement, c'est ça ma conclusion. Voilà. Encore une fois, je suis vraiment, vraiment désolé d'avoir zappé l'heure correcte de début. On a réussi à faire tenir l'essentiel dans le temps qui restait. Voilà.

*** Question auditoire ***
« En France, en terme de politique sur ce qui se passe sur le terrain, est ce que c'est en phase d'investissements ? Est ce qu'il y a des nouvelles centrales qui pourraient être construites ? »
Ah. Alors, aujourd'hui, la politique française est une politique – et j'espère que je ne vais choquer aucun ancien élève de Ginette dans cette salle – mais c'est une politique monstrueusement jésuite. C'est-à-dire que c'est une politique qui consiste à dire : « J'en fais, tout en ayant honte d'en faire, tout en trouvant que, quand même, ce n'est pas mal d'en faire, et que je vais dire que je vais en faire un peu plus d'un côté, tout en disant que je vais en faire un peu moins de l'autre… » C'est exactement ça, en France. C'est le genre de trucs que vous sort votre gamin quand vous l'avez pris la main dans le pot de confiture et qu'il essaye de vous expliquer que « non, non, pas du tout ». C'est exactement ça, la position du pouvoir français en ce moment.

Alors du côté « plus », on a demandé à EDF de commencer à regarder où elle allait construire de nouvelles centrales. On a mis en route la construction d'une centrale à Flamanville, avant les 2 EPR qu'on a commencé à construire à Taishan, en Chine, et qu'on terminera après. C'est assez rigolo, parce que, plus la centrale a été commencée tôt, plus elle sera terminée tard. Ce n'est pas tout à fait vrai parce qu'Olkiluoto, en Finlande, sera probablement lancée avant Flamanville quand même, mais peu importe. Les règles ne sont pas tout à fait les mêmes.

Je vais vous donner un exemple, caricatural, pour que vous compreniez bien. En France, si vous avez un couvercle de cuve que vous laissez tomber par terre,

l'ASN vous dit : « Vous le refaites. » En Chine, vous laissez tomber le couvercle de cuve par terre – et je tiens ça d'un dirigeant de Framatome – les Chinois le passent aux rayons X, le testent à l'hélium, etc., et disent : « Ça va bien, je l'installe. » Donc, voilà. Mais les deux se défendent. Les Chinois ont un truc beaucoup plus pragmatique. Je ne suis pas sûr qu'ils courent beaucoup plus de risques.

Donc là, on a dit à EDF : « Faites des nouvelles centrales. » Mais dans le même temps, on lui dit : « On va descendre la part du nucléaire à 50%. » On dit également que cette descente à 50% est destinée à avoir moins de réacteurs.

Je ne sais pas si j'ai le temps de vous le montrer la prochaine fois, mais il y a une page sur mon site personnel qui disserte là-dessus, qui s'appelle « 50% ou 50% » pour ceux qui ont envie d'aller voir, où j'explique que l'observation du cas allemand et du cas espagnol fait que, personnellement, si j'ai mon propre argent à parier – et je suis prêt à le faire – 50% de nucléaire, ça ne veut pas dire qu'on ferme un réacteur sur trois.

Ça veut dire qu'on va baisser de 30% le facteur de charge de l'ensemble du parc nucléaire, parce qu'une nuit d'hiver sans vent, vous n'accepterez pas que les trains n'avancent pas, que le laminoir ne fonctionne pas, qu'à 19 heures par un soir d'hiver l'ascenseur n'arrive pas, que vous soyez dans le noir, et que votre cuisinière ne marche pas, etc. Vous n'accepterez pas ça, et donc on va garder les centrales nucléaires en sécurité. Et on les fait fonctionner quand il n'y a pas de vent et pas de soleil.

C'est exactement ce qu'ont fait les Allemands. Les Allemands ont la même puissance électrique pilotable aujourd'hui, qu'ils avaient il y a 17 ans. La même. 100 gigawatts. Sauf que le facteur de charge a baissé de 25%. Un peu plus même, 30%. Alors, qu'est-ce qui se passe si vous faites baisser le facteur de charge d'un système à coûts fixes ? Vous faites baisser ses recettes, alors que les coûts sont les mêmes, donc en fait vous allez augmenter le risque nucléaire. Donc le programme français est un truc qui est destiné à augmenter le risque nucléaire – c'est ça ma conclusion – tout en vous disant que c'est l'inverse.

On dit en France : « C'est caca-beurk, mais quand même si on pouvait avoir des succès à l'exportation, ça serait quand même vachement bien. » Donc, chez nous, on va fermer Fessenheim, mais : « Quand même, si on pouvait en refiler à Abou Dhabi, ça serait quand même bien… » Et puis : « Quand même, le fait que les Finlandais prennent le deuxième réacteur chez Rosatom alors que nous, on en a des vachement bien à leur fournir, quand même, c'est des gens pas sympas… »

Bon, d'accord ? « Eat your own food » quoi, à un moment. L'attitude française aujourd'hui sur le nucléaire, est le truc le plus ambivalent qui soit et le plus mou : une espèce d'ectoplasme, un jour à gauche, un jour à droite, un jour à gauche, un jour à droite… Et c'est le reflet, notamment, d'une opinion qui elle-même est un peu hésitante, qui ne comprend pas bien, etc.

Les Anglais ont une attitude beaucoup plus cash sur le nucléaire, et disent : « Nous, on en veut. Si les Français, vous n'êtes pas capables d'en faire, on demandera aux Chinois. » Les Russes en font plein. Le carnet de commandes de Rosatom, il y a 30 réacteurs dedans, et on ne sait même pas comment ils vont faire pour les construire, tellement ils en ont. Et puis ils continuent à en engranger encore plein, des commandes. Les Chinois, ils doivent avoir 20 réacteurs en construction.

J'avais fait une intervention pour l'INSTN il y a quelques années, dans laquelle j'avais dit en conclusion : « Je suis absolument certain qu'il y aura du nucléaire dans 30 ans si d'ici là on n'a pas une météorite qui nous est tombée dessus, ou la guerre thermonucléaire, ou un virus qui nous aura éradiqué. J'en suis certain. La seule question est de savoir s'il sera chinois en Chine, chinois en France, ou français en France. » Mais sinon, je suis sûr qu'il y en aura, s'il y a toujours quoi que ce soit qui ressemble à une humanité à peu près industrielle, j'en suis absolument certain.

Du coup, on prend du retard, parce que, quand vous avez un actionnaire qui n'arrête pas de dire à sa filiale : « Ce que tu fais, ce n'est pas terrible, mais fais-le quand même. Mais quand même, ce n'est pas terrible, et puis je vais dire publiquement que ce n'est pas terrible. Mais quand même, fais le quand même… »

Alors, le vent commence à se retourner un tout petit peu dans l'opinion. Je rencontre de plus en plus de gens qui étaient classiquement prédestinés à être antinucléaires – si vous me pardonnez cette façon caricaturale d'étiqueter les gens : plutôt du bobo de gauche bien-pensant – qui se mettent à me dire : « Mais c'est complètement stupide de fermer des réacteurs nucléaires ! » Voilà. Donc des gens inattendus. C'est intéressant de constater qu'on commence à en voir quelques-uns, et pas nécessairement des moindres.

*** Question auditoire ***
« Et du coup vous nous avez montré qu'il n'y avait pas de corrélations entre maladies, malformations – je caricature – et irradiations. D'où est ce qu'elle vient cette idée commune ? »
Eh bien, je vous l'ai dit, je ne sais pas. La question est : « Pourquoi est-ce que le nucléaire fait partie de ces quelques sujets, et il n'y en a pas tant que ça,

où la compréhension de la population sur les dangers est raisonnablement orthogonale à la réalité des dangers ? » Vous avez un certain nombre de dangers environnementaux sur lesquels les gens peuvent avoir une idée un peu exagérée ou, au contraire, pas assez prégnante, quelque part sous-estimée, mais comprennent tout de même que « ça pue ».

Par exemple, sur la question du changement climatique, les gens n'ont pas nécessairement en tête la réalité des risques, mais ils comprennent bien que c'est un truc emmerdant. Sur les phytosanitaires, les gens n'ont pas en tête la réalité des risques, mais ils comprennent bien qu'un truc qui est bazardé dans la nature pour tuer des êtres vivants, en l'occurrence des insectes ou des herbes, il y a un moment où ça ne doit pas être terrible pour nous. D'accord ?

C'est vrai qu'il faut aller regarder d'un peu près, c'est une question de dose, etc. Soit. Mais quand même, on peut se poser la question.

Toujours sur la pêche, par exemple, il y a des gens qui peuvent se dire : « Oui effectivement, on voit les stocks de poissons baisser, il va bien se passer quelque chose. »

Il y a quelques sujets environnementaux, dont le nucléaire fait partie, où il y a en France – et j'insiste sur le fait que c'est français, parce que ce n'est pas vrai dans tous les pays du monde – un écart assez significatif entre les faits documentés par la littérature scientifique et l'opinion qu'on peut en avoir. Pas la technologie, mais bien la littérature scientifique au sens de : « j'observe le monde ». Voici quelques hypothèses, à vraiment les prendre comme telles, de différence entre les deux.

La première, c'est que dans la presse, l'anti-nucléarisme, si vous l'observez bien, est essentiellement le fait des médias de service public, ou qui se considèrent comme tel. Par exemple, Le Monde se considère comme un média de service public. L'hypothèse que je fais, ce n'est qu'une hypothèse je le répète, est que quand vous êtes dans un média, alors vous voulez montrer que vous êtes indépendant.

Le journaliste veut montrer qu'il est indépendant, qu'il n'est à la botte de personne. Et si c'est l'Etat qui vous paye, la meilleure manière de montrer que vous n'êtes pas à la botte de l'Etat, c'est de dire du mal de ce que fait l'Etat. Donc si vous êtes journaliste de service public – et ça c'est aussi un truc que vous allez pouvoir remarquer – vous allez dire préférentiellement du mal de la police, de la façon dont on organise le système d'enseignement, de la façon dont fonctionne l'hôpital, de la SNCF, etc. À ce moment, je pense que le nucléaire passe tout simplement dans ce grand ensemble. Comme c'est un truc que fait l'Etat, crac ! Ça passe dans tous les trucs que l'Etat fait de travers.

Et vous pouvez remarquer que, quand vous avez une émission, par exemple « Complément d'enquête » ou « Investigation spéciale », etc., sur France 2 ou sur France 3, ça n'est que de l'instruction à charge. Donc on ne va pas vous amener un médecin, alors que je vous ai montré que ce sont les médecins qui détenaient les clés de lecture sur : « Est-ce que c'est dangereux ou pas pour la santé ? » Vous n'en verrez jamais un. C'est les ingénieurs qui savent vous dire comment fonctionne un réacteur, vous n'en verrez jamais un. C'est les physiciens qui savent vous expliquer ce que c'est que le nucléaire, vous n'en verrez jamais un.

Vous verrez les militants anti-nucléaires, toujours les mêmes. C'est un parti pris de la presse, ça. Et je vous dis que j'ai une explication putative, mais ça reste une hypothèse.

Après, il y a également un deuxième truc qui, à mon avis, pèse en France, c'est le tandem franco-allemand. La France considère depuis très longtemps que le socle fondateur de l'Europe, c'est le couple franco-allemand. Alors, il y a des tas de bonnes raisons de penser que c'est vrai, mais il se trouve que pour les allemands, le nucléaire est un sujet qui est historiquement beaucoup plus affectif qu'en France.

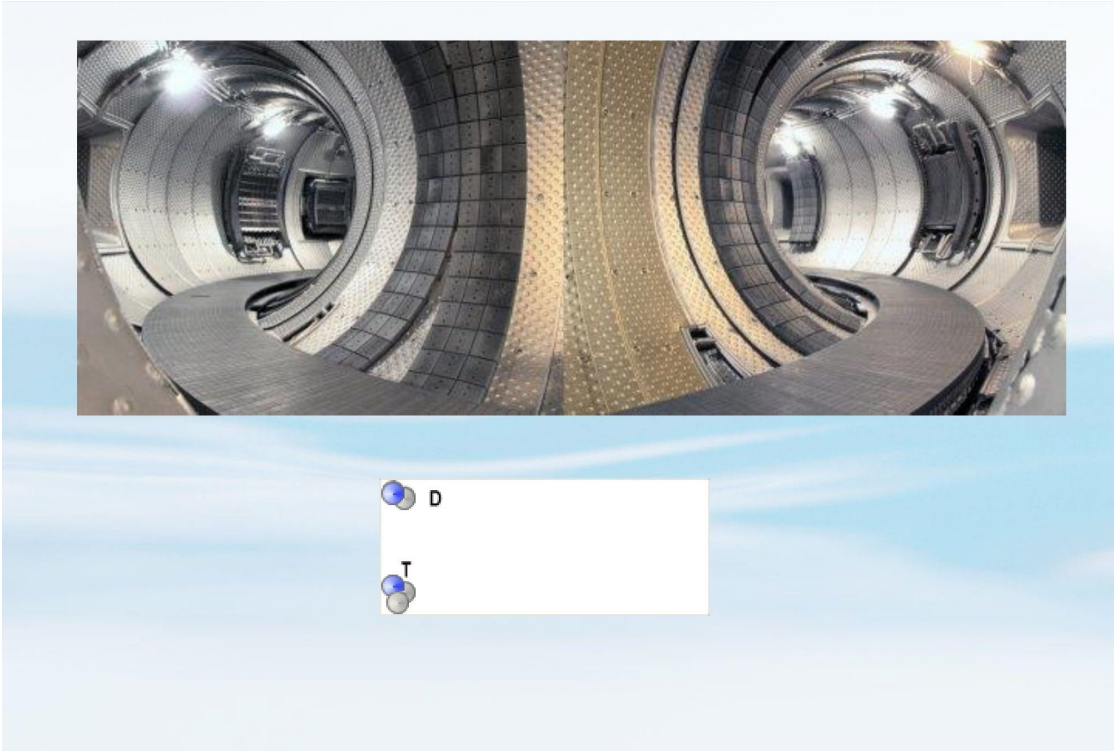
Ils ont eu deux fusées Pershing sur leur sol, c'est un traumatisme, etc. Ça rappelle la Seconde Guerre Mondiale, c'est plein de trucs qui sont assimilés, ou associés, à des pensées beaucoup plus affectives que pour nous français. Et donc, dans le couple franco-allemand, il y a eu, en gros, ces allemands qui font tout bien, qui ont une économie qui tient la route, une vraie industrie, etc., et qui par ailleurs n'aiment pas le nucléaire.

C'est également une hypothèse, mais je me dis que ça a peut-être joué un rôle dans le fait que la France s'est progressivement écartée d'une industrie nucléaire, dont au début elle a été extrêmement fière, dans les années 70-80, population incluse !

Alors aujourd'hui, dans la population, vous avez 50% de « pro-tièdes », 30% d'anti-tièdes » et 15% de gens qui vous disent qu'ils ne savent pas, si vous regardez dans la manière dont les gens disent ce qu'ils en pensent. Donc, c'est un essai. Je n'ai pas fini mon étude de cas sociologique pour savoir pourquoi la situation se présente comme ça dans notre pays. Ça reste un truc, pas un mystère non résolu, mais ça reste une question partiellement non résolue.

∗∗∗ Question auditoire ∗∗∗
« Vous allez peut être en parler dans un autre cours, mais est ce que les recherches qui sont faites en ce moment sur la fusion nucléaire ça nous permettra . . . »

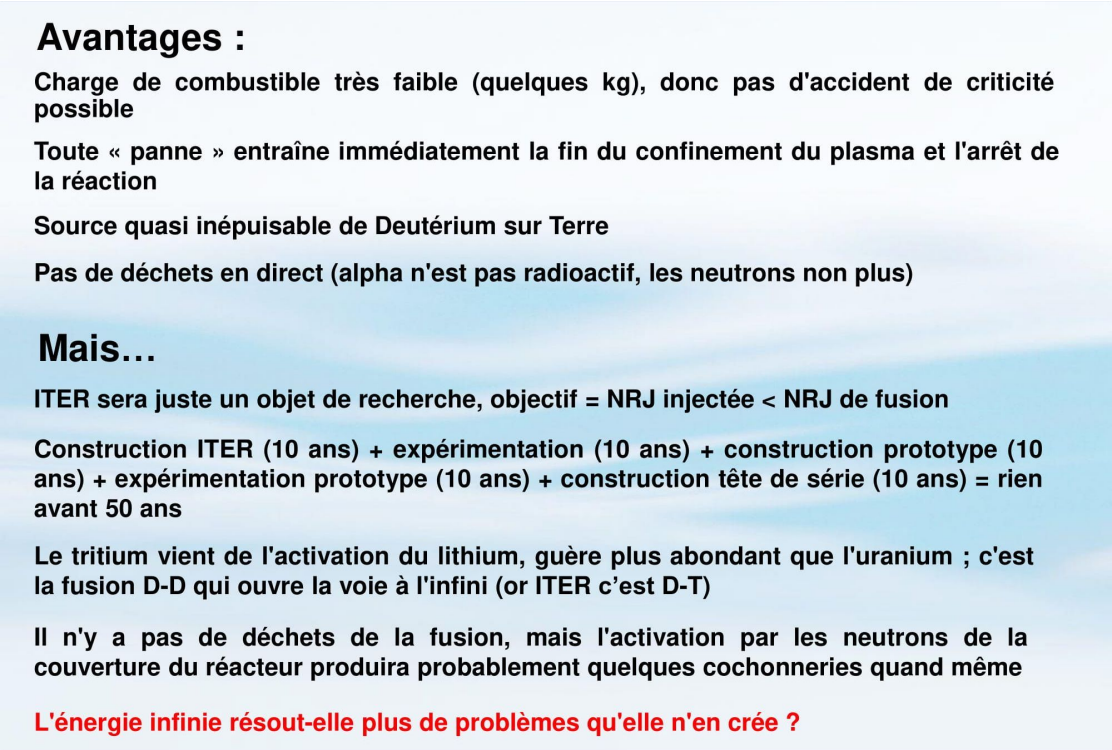
64. Et la fusion ?



Diapositive 66.

Aha. Du coup, je pensais que je n'avais pas le temps. Alors la fusion : est-ce que ça marche ?

65. La fusion, c'est mieux que la fission ?



Diapositive 67.

Alors, si ça marche, oui. Le problème, c'est que comme réacteurs industriels, ça ne marchera pas avant que vous soyez morts. Alors, je vous la fais courte mais bonne. Aujourd'hui, on est en train de construire ITER. Alors, la fusion c'est quoi ? C'est que vous mettez la matière sous forme de plasma. Vous savez tous ce que c'est qu'un plasma ? Un plasma c'est quelques millions de degrés, et pour porter la matière à quelques millions de degrés, il faut la chauffer. Donc vous avez un investissement initial en énergie pour porter la matière à quelques millions de degrés.

Par ailleurs, une fois que la matière est à quelques millions de degrés, c'est compliqué de mettre ça dans une boîte en plastique, d'accord ? Ça ne tiendrait pas bien, donc la seule manière que vous avez de confiner ça, c'est dans un champ magnétique. Et ça tombe bien, c'est une matière ionisée. Donc dans un champ magnétique. Donc, en fait, le principe de la fusion, c'est : vous faites un champ magnétique pour confiner le plasma sous forme de tore et déclencher dans ce plasma une réaction de fusion.

65. LA FUSION, C'EST MIEUX QUE LA FISSION ?

ITER est un engin qui est destiné à valider expérimentalement la possibilité de retirer un peu plus d'énergie de fusion, que l'énergie que vous avez utilisée pour mettre le plasma en chauffe. Donc avec ITER, on sera content si on fait de la fusion sur quelques minutes. Actuellement, dans les *tokamaks*, vous êtes plutôt à quelques secondes.

Donc c'est un gros tokamak. Il faut encore dix ans pour construire ITER. Premier plasma : 2025 est annoncé. Vous faites fonctionner 10 ans : 2035. Après, vous vous grattez la tête pendant cinq ans pour savoir ce que vous allez faire derrière : 2040. Puis, vous commencez à construire le truc qui est derrière, éventuellement un prototype de réacteur de fusion, c'est-à-dire un truc où la fusion ne dure pas 2 minutes, mais 5000 heures. Parce que dans les réacteurs nucléaires actuels, la réaction dure 5000 heures, voire trois ans, donc 24000 heures sans s'arrêter. Vous ne pouvez pas faire un réacteur industriel pour servir la population en électricité avec un truc qu'il faut redémarrer toutes les dix minutes. Ça ne marche pas bien.

Donc, il faut faire le truc d'après. Donc. 2025, 2035, 2040 : on décide de construire un démonstrateur de réacteur industriel de fusion. En 2055-2060, il est prêt. En 2070, il a fonctionné 10 ans, et en 2075, vous commencez à construire une tête de série, qui sera donc terminée d'être construite en 2090, ou 2095, c'est-à-dire que vous serez morts, depuis longtemps.

Donc, la fusion, avec les échéances que je vous ai montrées, à la fois sur le changement climatique et sur la question d'approvisionnement en combustibles fossiles dans les zones qui commencent à être un peu contraintes, notamment l'Europe, vous oubliez. Ça ne fait pas partie des moyens du bord.

Et toujours pour rester dans le politiquement incorrect, je fais partie des gens extrêmement pro-nucléaires qui n'auraient jamais mis un centime dans ITER. Si ça n'avait dépendu que de moi, on ne l'aurait jamais fait. On aurait mis cet argent dans un programme de quatrième génération accéléré, dans la fission. Ce truc-là ne va jamais déboucher.

*** Question auditoire ***
Question sur la validation de la durée de vie des centrales nucléaires.
Alors comme disent les Américains – « That's a good question ! » – quand ils veulent être polis avec leurs interlocuteurs : très bonne question ! C'est une manière de se mettre les journalistes dans la poche généralement. Alors, il faut savoir qu'une centrale nucléaire, c'est un assemblage de LEGOs, donc ce n'est pas un objet monobloc qui a une durée de vie en tant qu'objet monobloc.

65. LA FUSION, C'EST MIEUX QUE LA FISSION ?

C'est un assemblage de LEGOs, dans lequel, chaque brique de LEGO a sa propre durée de vie. En fait, la seule brique de LEGO que vous ne pouvez pas changer dans une centrale nucléaire, une fois que vous l'avez construite, c'est la cuve du réacteur. Tout le reste, vous pouvez le changer. Et donc, un grand paradoxe, par exemple, c'est que Fessenheim est une des centrales les plus « neuves » du parc français, parce que comme elle a été construite il y a longtemps, il y a longtemps qu'on a changé tout ce qu'on pouvait changer à l'intérieur. On a changé les alternateurs, les générateurs de vapeur, les groupes électrogènes de secours, etc. Vous avez à peu près tout changé.

Donc en fait, le constructeur vous dit : « Moi je fais mes plans pour que ça dure au moins tant de temps. » La seule pièce pour laquelle ce raisonnement vaut éventuellement quelque chose, c'est la cuve du réacteur du coup, comme tout le reste, vous pouvez le changer.

La manière dont ça se passe, c'est que vous avez l'autorité de sûreté qui vient tous les dix ans regarder le réacteur et vous dire : « Il est bon pour le service, tel qu'il se présente, pour les 10 ans qui viennent », ou « Quoi que vous fassiez dessus, je décide de l'arrêter », c'est-à-dire : « Ce truc ne tient plus la route et en particulier la cuve, et j'estime que ses fragilités font qu'elle ne peut pas garantir un fonctionnement sûr pour les années qui viennent. » Ou bien un cas intermédiaire qui arrive souvent en France, qui est : « Je vous re-signe dix ans, à condition que vous me fassiez ça, ça, ça, ça, ça, et ça. Vous me changez tel machin, vous rajoutez tel truc, etc. » D'accord ?

Post-Fukushima, par exemple, l'ASN a demandé à EDF de mettre toutes ses centrales nucléaires en conformité avec des normes de sûreté plus élevées. Par exemple, mettre sous le bâtiment réacteur un radier pour récupérer le corium, si jamais le cœur fond. Enfin, voilà. Un certain nombre de trucs. Et donc, dans le Grand Carénage qu'EDF a démarré, vous avez une partie des investissements qui sont une augmentation des normes de sûreté, que l'ASN a demandé aux réacteurs français.

Les réacteurs français, pour lesquels on avait dit au début « on se les donne pour 40 ans », aujourd'hui, EDF dit « on va les prolonger à 50 ou 60 ans, si on peut ». Et le « si on peut », c'est si l'ASN nous donne l'autorisation de le faire. Dit autrement, EDF considère que si l'ASN donne l'autorisation, ça ne fait pas courir de risque de les exploiter à 50 ou 60 ans.

Aux Etats-Unis, je vous ai dit qu'il y avait une centaine de réacteurs en fonctionnement. La quasi-totalité, sinon la totalité des 100 réacteurs en fonctionnement, ont été autorisés pour 60 ans. La quasi-totalité. Cela étant, la philosophie de l'autorité de sûreté américaine est différente parce qu'eux considèrent qu'à

tout instant, le réacteur doit être conforme à ses spécifications de départ. Alors qu'en France, comme je le disais tout à l'heure, à tout instant, vous devez être conformes aux spécifications du moment, lesquelles se durcissent avec le temps. Mais donc, aux Etats-Unis, on dit : « Si à tout instant c'est conforme à ce que ça devait faire au moment où vous avez construit le réacteur, ça me va bien. » Et donc, ils ont tous demandé leur extension à 60 ans, et il y en a un certain nombre qui commence à réfléchir à l'extension à 80 ans. Et de fait, tant que vous n'avez pas de défaut sur la cuve, ça ne pose pas le problème de principe. D'accord ?

Et pour revenir au pont du Gard, dont je parlais tout à l'heure, tant que les pierres du pont du Gard ne se fissurent pas, il peut continuer à servir de pont. Et ça fait 2000 ans qu'il sert de pont, et si ça se trouve il peut servir de pont pour encore 2000 ans. Alors qu'il y a longtemps que le pont construit par un constructeur que je ne nommerai pas, reliant un endroit que je ne nommerai pas à un autre endroit que je ne nommerai pas, se sera cassé la gueule. Comme le pont de Gênes. Voilà.

Ce qu'il faut comprendre, c'est qu'en fait, cette notion de durée de vie n'a pas tellement d'intérêt, parce qu'encore une fois, ce n'est pas monobloc, et que c'est un processus d'évaluation permanente de l'état de ce que vous avez en face de vous qui est la bonne réponse.

∗∗∗ Remarque auditoire ∗∗∗
« Excusez moi de revenir à la charge, mais ITER n'est pas le seul projet de fusion du monde, il y a des gens qui utilisent d'autres méthodes. »
Ils en sont au même stade, c'est-à-dire qu'aujourd'hui, personne n'est capable de vous faire un plasma qui reste en fusion pendant 5000 heures. ITER, par ailleurs, il était décidé que ça coûte 30 milliards d'euros. Je pense que là, on doit être rendu à 50 ou 60 ou 90 milliards d'euros, après le facteur π. Admettons qu'on fasse un réacteur de fusion, d'ici à ce que vous mouriez. Ça ne change strictement rien à ce que je vous ai raconté.

∗∗∗ Remarque auditoire ∗∗∗
« Qu'est ce qui explique par ailleurs que pour un réacteur de fusion on va mettre au moins 100 ans, alors ce que les centrales nucléaires cela a mis moins longtemps ? »
Parce que ce n'est pas la même chose. Parce que c'est quand même beaucoup plus simple de faire fissionner un matériau, en laissant le matériau à quelques centaines de degrés, que de porter un plasma à quelques millions de degrés. C'est juste beaucoup plus simple.

*** Question auditoire ***
« Et l'avantage de se compliquer la vie à faire de la fusion ? »
Ah ! Alors, l'avantage, c'est que, tout ce que nous pouvons, nous le ferons. Il y a un philosophe qui a dit ça. « Tout ce que nous pouvons, nous le ferons. » Donc à un moment on a créé de la recherche, il y a des physiciens qui ont découvert les interactions fortes. Donc ils ont commencé à regarder ce qu'il se passait à l'intérieur du noyau. Ils ont compris que, sur le papier, on pouvait fusionner des noyaux et que ça faisait des noyaux plus lourds. Ils ont constaté que c'était ce qu'il se passait dans le soleil. Et ils se sont dit « Tiens ! Ça serait rigolo d'essayer de faire pareil. » Et donc : « Tout ce que nous pouvons, nous le ferons. »

*** Question auditoire ***
« Il n'y a pas d'avantage intrinsèque en terme de radioactivité, etc. ? »
Pourquoi est-ce qu'on fait des taxis volants dans Paris ? Pourquoi est-ce que la RATP rêve de faire des taxis volants dans Paris ? Parce que : « Tout ce que nous pouvons, nous le ferons. » D'abord on « fait » parce qu'on trouve ça rigolo de faire des trucs nouveaux, et ensuite on se pose la question de savoir si c'était une bonne idée. Pour tout ! Non, mais c'est exactement ça ! Regardez l'histoire des techniques. C'est ça du début à la fin : « Tout ce que nous pouvons, nous le ferons. ». C'est comme ça.

*** Question auditoire ***
« Pourquoi est-ce qu'on n'est pas déjà parti sur les réacteurs à neutrons rapides ? »
Pourquoi est-ce qu'on fait les réacteurs qu'on fait aujourd'hui ? C'est une bonne question. Il se trouve que, par exemple, au début des années 50, les militaires américains avaient envisagé de faire un avion de combat avec un réacteur à sels fondus. Ce n'est pas du tout la même technologie, parce que c'est des réacteurs qui sont extrêmement réactifs, qui vous rendent capable de piloter une puissance à la manière d'une pédale d'accélérateur. Alors en fait, la raison pour laquelle on est parti sur la technologie qu'on utilise aujourd'hui, d'après ce que j'ai compris, c'est parce qu'elle est dérivée des premiers réacteurs qui ont été mis au point pour des raisons militaires, qui étaient des réacteurs de propulsion de bâtiments de guerre marine.

En fait, concernant les réacteurs qu'on fait aujourd'hui, à cœur solide, à l'uranium : la filière uranium, on est parti dessus parce que l'uranium et le plutonium permettent de faire des armes, alors que la filière thorium, non. Donc ça a été un des critères de choix, entre uranium et thorium. Et ensuite, les réacteurs refroidis à eau, à cœur solide, c'est une technologie avec laquelle vous pouvez faire des réacteurs assez compacts, que vous pouvez embarquer sur des porte-avions, ou des sous-marins, et donc c'est la raison pour laquelle on a commencé

par développer ces réacteurs-là, qu'on savait faire. Et puis, une fois qu'on savait faire ceux-là, *confer* ce que j'ai dit tout à l'heure : « Tout ce que nous pouvons, nous le ferons. »

Donc on les a faits, et ensuite on s'est dit : « Tiens, on peut en faire de l'électricité aussi. » Et donc, c'est cette technologie-là qu'on a dérivé pour faire de l'électricité. À ce moment-là, on ne s'est pas dit : « On va reprendre la copie à zéro, et les réacteurs pour faire de l'électricité on va éventuellement utiliser une technologie totalement différente. » On avait ça dans les cartons et donc c'est ça qu'on a utilisé.

*** Question auditoire ***
« En l'occurence, les réacteurs à sels fondus et les réacteurs à neutrons rapides on les avaient déjà fait ? Alors pourquoi on a pas directement embrayé sur ces technologies ? »
Parce qu'une fois que vous avez des industriels qui sont installés sur le marché avec une technologie dominante, on reste à ça. Tant qu'ils ne sont pas menacés, tant qu'on n'a pas inventé la photo numérique, c'est Kodak qui domine le marché. D'accord ? Donc là, tant que vous avez des gens qui ont mis au point des technologies qui avaient déjà un premier usage – et donc ils avaient déjà les brevets, ils avaient déjà les ingénieurs qui savaient faire, etc. –, s'il suffit de faire la même chose en plus gros, vous avez un avantage concurrentiel terrible par rapport aux gens qui repartent de zéro dans leur laboratoire. C'est évident. C'est la filière industrielle qui va aller de l'avant.

Alors aujourd'hui, il y a un certain nombre de gens, encore une fois, qui se grattent la tête. On est un peu en train de rebattre les cartes. Mais il n'empêche que la technologie dominante, et pour encore longtemps, sur le marché, c'est la technologie à cœur solide, à uranium enrichi, et refroidissement à l'eau. Bon. Faute de questions – c'est-à-dire de combattants – on lève la séance ?

Bon, eh bien, comme dans les bonnes assemblées de copropriété, le procès-verbal vidéo est terminé, et donc, à la semaine prochaine. Cette fois, je sais l'heure !

Fin.



The Shifters: association de bénévoles en soutien au Shift Project

The Shifters est un réseau de bénévoles aux profils, expériences et compétences très variés (mais qui se rejoignent par leur intérêt) pour la transition carbone de l'économie, qu'ils soient déjà actifs dans ce domaine ou non.

Les Shifters se consacrent à trois missions:

- *Appuyer* The Shift Project dans ses travaux, en mettant ponctuellement à disposition de l'équipe du Shift leur force de travail et/ou leurs compétences.
- *S'informer*, débattre et se former sur la décarbonation de l'économie (sous ses aspects aussi bien scientifiques que techniques et politiques, au sens large, et en termes d'enjeux, d'acteurs, de solutions et d'actualité).
- *Diffuser* les idées et travaux du Shift dans leurs propres réseaux et développer de nouveaux réseaux dans la décarbonation de l'économie. Ils s'appuient pour ce faire sur les cinq valeurs fondamentales que sont l'exigence scientifique et technique, l'ouverture, l'impartialité, le professionnalisme et la convivialité.

Rejoindre les Shifters

Que vous soyez traducteur, professeur, en recherche d'emploi, père au foyer, artiste, ingénieur ou écrivain, médecin ou jardinier, antiquaire ou maraîchère, tous les talents sont les bienvenus pour relever ensemble les défis du changement climatique et de la transition énergétique!

- *Si vous voulez nous rejoindre*, rendez-vous sur l'onglet *Nos bénévoles « Shifters »* à l'URL suivante: `https://theshiftproject.org/equipe/`
- *Pour toute autre question*, vous pouvez envoyer un mail à: `contact-shifters@theshiftproject.org`.