

POUR UN ARRET IMMEDIAT

DU DEVELOPPEMENT MASSIF DE L'ELECTRONUCLEAIRE

4 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156 157 158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177 178 179 180 181 182 183 184 185 186 187 188 189 190 191 192 193 194 195 196 197 198 199 200 201 202 203 204 205 206 207 208 209 210 211 212 213 214 215 216 217 218 219 220 221 222 223 224 225 226 227 228 229 230 231 232 233 234 235 236 237 238 239 240 241 242 243 244 245 246 247 248 249 250 251 252 253 254 255 256 257 258 259 260 261 262 263 264 265 266 267 268 269 270 271 272 273 274 275 276 277 278 279 280 281 282 283 284 285 286 287 288 289 290 291 292 293 294 295 296 297 298 299 300 301 302 303 304 305 306 307 308 309 310 311 312 313 314 315 316 317 318 319 320 321 322 323 324 325 326 327 328 329 330 331 332 333 334 335 336 337 338 339 340 341 342 343 344 345 346 347 348 349 350 351 352 353 354 355 356 357 358 359 360 361 362 363 364 365 366 367 368 369 370 371 372 373 374 375 376 377 378 379 380 381 382 383 384 385 386 387 388 389 390 391 392 393 394 395 396 397 398 399 400 401 402 403 404 405 406 407 408 409 410 411 412 413 414 415 416 417 418 419 420 421 422 423 424 425 426 427 428 429 430 431 432 433 434 435 436 437 438 439 440 441 442 443 444 445 446 447 448 449 450 451 452 453 454 455 456 457 458 459 460 461 462 463 464 465 466 467 468 469 470 471 472 473 474 475 476 477 478 479 480 481 482 483 484 485 486 487 488 489 490 491 492 493 494 495 496 497 498 499 500 501 502 503 504 505 506 507 508 509 510 511 512 513 514 515 516 517 518 519 520 521 522 523 524 525 526 527 528 529 530 531 532 533 534 535 536 537 538 539 540 541 542 543 544 545 546 547 548 549 550 551 552 553 554 555 556 557 558 559 560 561 562 563 564 565 566 567 568 569 570 571 572 573 574 575 576 577 578 579 580 581 582 583 584 585 586 587 588 589 590 591 592 593 594 595 596 597 598 599 600 601 602 603 604 605 606 607 608 609 610 611 612 613 614 615 616 617 618 619 620 621 622 623 624 625 626 627 628 629 630 631 632 633 634 635 636 637 638 639 640 641 642 643 644 645 646 647 648 649 650 651 652 653 654 655 656 657 658 659 660 661 662 663 664 665 666 667 668 669 670 671 672 673 674 675 676 677 678 679 680 681 682 683 684 685 686 687 688 689 690 691 692 693 694 695 696 697 698 699 700 701 702 703 704 705 706 707 708 709 710 711 712 713 714 715 716 717 718 719 720 721 722 723 724 725 726 727 728 729 730 731 732 733 734 735 736 737 738 739 740 741 742 743 744 745 746 747 748 749 750 751 752 753 754 755 756 757 758 759 760 761 762 763 764 765 766 767 768 769 770 771 772 773 774 775 776 777 778 779 780 781 782 783 784 785 786 787 788 789 790 791 792 793 794 795 796 797 798 799 800 801 802 803 804 805 806 807 808 809 810 811 812 813 814 815 816 817 818 819 820 821 822 823 824 825 826 827 828 829 830 831 832 833 834 835 836 837 838 839 840 841 842 843 844 845 846 847 848 849 850 851 852 853 854 855 856 857 858 859 860 861 862 863 864 865 866 867 868 869 870 871 872 873 874 875 876 877 878 879 880 881 882 883 884 885 886 887 888 889 890 891 892 893 894 895 896 897 898 899 900 901 902 903 904 905 906 907 908 909 910 911 912 913 914 915 916 917 918 919 920 921 922 923 924 925 926 927 928 929 930 931 932 933 934 935 936 937 938 939 940 941 942 943 944 945 946 947 948 949 950 951 952 953 954 955 956 957 958 959 960 961 962 963 964 965 966 967 968 969 970 971 972 973 974 975 976 977 978 979 980 981 982 983 984 985 986 987 988 989 990 991 992 993 994 995 996 997 998 999 1000 1001 1002 1003 1004 1005 1006 1007 1008 1009 1010 1011 1012 1013 1014 1015 1016 1017 1018 1019 1020 1021 1022 1023 1024 1025 1026 1027 1028 1029 1030 1031 1032 1033 1034 1035 1036 1037 1038 1039 1

INTRODUCTION

Dans un premier appel, nous avons manifesté notre inquiétude devant le programme nucléaire français, demandé l'ouverture d'un véritable débat et exprimé des réserves concernant notamment les problèmes posés par la sûreté de la filière à eau légère, les surrégénérateurs et les déchets.

L'action menée par les populations a favorisé l'ouverture d'une campagne d'informations à laquelle nous participons dans la mesure de nos moyens.

Par ailleurs, nous avons étudié des documents scientifiques et recueilli des informations précises qui nous permettent de dégager les points suivants.

I - Sûreté des réacteurs de la filière à eau légère

Si des accidents majeurs qui n'ont d'ailleurs rien à voir avec l'explosion d'une bombe, sont peu probables, leurs conséquences peuvent être très graves. Le coeur d'un réacteur à eau légère de 1 000 MWe contient plusieurs centaines de kilogrammes de plutonium et de produits de fission. L'accident que l'on peut craindre est la fuite dans l'environnement d'une fraction notable de ces produits hautement toxiques. Or, la cuve et les canalisations du circuit de réfrigération se fragilisent au cours de la vie du réacteur. Pour compenser la perte de réfrigérant due à la rupture d'une canalisation importante, un dispositif de refroidissement de secours (dit ECCS) doit injecter très rapidement une grande quantité d'eau froide. Sinon, l'énergie dégagée par la désintégration des produits de fission ferait fondre le réacteur dans les minutes qui suivent l'accident. Cela pourrait provoquer la fusion de la cuve et la rupture de l'enceinte de confinement.

Or, les constructeurs n'ont jamais pu faire la preuve de l'efficacité de l'ECCS et l'optimisme officiel se fonde sur des simulations sur ordinateur ou des expériences partielles, n'ayant pas grand rapport avec les conditions réelles de fonctionnement des réacteurs de puissance.

Par ailleurs, la rupture de la cuve n'est pas à exclure, par exemple en cas de fonctionnement de l'ECCS étant donné le choc

SECRET

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

CONFIDENTIAL

thermique qu'elle subirait.

Face aux inquiétudes du public et de nombreux spécialistes, l'administration américaine, suivie des officiels et des constructeurs français, s'abrite derrière les conclusions du rapport Rasmussen selon lesquelles :

- 1) la probabilité d'une perte totale de réfrigérant est extrêmement faible
- 2) les conséquences d'un tel accident seraient négligeables.

Comme le montrent de récents accidents considérés comme hautement improbables, voire impossibles par les experts, les calculs de probabilité d'événements rares régis par des phénomènes extrêmement complexes, notamment des erreurs humaines, sont entachés de grandes incertitudes. Il est donc imprudent d'accorder une grande confiance aux résultats de ce type de calculs.

II - Les surrégénérateurs

Pour diminuer les problèmes d'approvisionnement en uranium, il est prévu de relayer la filière à eau légère par celle des surrégénérateurs à neutrons rapides. Or ces surrégénérateurs, à la différence de tous les autres réacteurs, peuvent être le siège d'explosions atomiques pudiquement appelées "excursions nucléaires". En effet, il peut s'y former ce que les experts appellent des "masses surcritiques promptes en neutrons rapides" ; la formation d'une telle masse surcritique est la base physique de la bombe atomique. On n'a aucune expérience de ce qui se passe lors de la formation de ces masses surcritiques au sein d'un surrégénérateur contenant plusieurs tonnes de plutonium. Des calculs prévisionnels indiquent que cela conduirait à une explosion équivalant à celle de plusieurs dizaines de tonnes d'explosifs classiques, explosion que les experts se font forts de contenir à l'aide d'enceintes de confinement. Or ces calculs nécessitent la mise en oeuvre de représentations très compliquées d'un phénomène extrêmement rapide (moins d'une milliseconde), et ne sont pas étayés par une base expérimentale suffisante. Outre le risque que les calculs soient faux dans des proportions considérables, les problèmes de fragilisation et de fissuration des enceintes au cours du temps conduisent à penser qu'une catastrophe sans précédent n'est pas impossible avec ce type de réacteur.

III - Les déchets

Les déchets et les produits de fission sont des sous-produits

inévitables de l'industrie nucléaire. En plus de leur réactivité et de leur toxicité chimique qui sont celles de beaucoup de déchets industriels, tous ces corps ont la propriété d'être radioactifs, et seul le temps réduit cet inconvénient. Aussi n'existe-t-il pas d'autre solution que le conditionnement dans des emballages (béton ou bitume pour les déchets de faible et moyenne activité, fûts en acier ou blocs de verre pour les déchets de haute activité). Or les produits de fission continuent à dégager de l'énergie pendant des siècles et ils échauffent et détériorent le conditionnement. Il faut donc les surveiller et les refroidir éventuellement pendant un ou plusieurs siècles avant d'envisager le "stockage définitif" (dans des formations géologiques).

La sûreté attribuée au stockage définitif n'est pas fondée sur des bases expérimentales sérieuses mais sur l'extrapolation à l'échelle du millénaire d'expériences de tenue des matériaux portant sur quelques années, et sur une confiance immodérée dans l'étanchéité des formations géologiques.

D'autres "solutions" sont parfois évoquées : envoi dans l'espace ou destruction dans des générateurs à fusion. Vu le tonnage des déchets haute activité et des produits de fission et vu l'état d'avancement des travaux sur la fusion, ces deux solutions relèvent de la science-fiction.

Nous avons étudié de manière plus détaillée les points précédents (voir annexes), mais le développement de l'industrie nucléaire soulève d'autres problèmes :

- le démantèlement des centrales après exploitation
- la multiplication des transports de matières radioactives
- le recyclage et le commerce du plutonium
- les rejets d'effluents radioactifs, et plus particulièrement ceux des usines de retraitement du combustible irradié
- la pollution thermique
- les effets conjugués des pollutions radioactive et chimique (effets synergiques)
- le cheminement des éléments radioactifs dans les chaînes alimentaires
- les effets génétiques des faibles doses d'irradiation sur de grandes populations, etc...

Ces raisons d'ordre scientifique ne sont pas les seules qui pourraient justifier notre opposition au programme nucléaire. Il peut y avoir des raisons d'ordre économique, social et politique, en particulier le système de contraintes policières et technocratiques qui accompagnera le développement massif de l'industrie nucléaire.

Mais ces raisons d'ordre scientifique nous paraissent suffisantes pour nous joindre aux nombreuses demandes de moratoires, ce qui signifie que pour notre part, NOUS DEMANDONS L'ARRET IMMEDIAT DU PROGRAMME DE DEVELOPPEMENT MASSIF DE L'INDUSTRIE NUCLEAIRE.

Et nous demandons que cette interruption soit mise à profit pour poursuivre l'étude des nombreux problèmes non résolus posés par l'électronucléaire et pour intensifier les recherches et le développement d'autres sources d'énergie.

Paris, le 30 avril 1975

J.M. ABILLON

A. ARNAUD

B. CAMBERLIN

A. COMERÇON

P. COURREGES

M. CROZON

A. FAYE

P. FLEURY

M. FROISSART

T. LERAY

A. MALAMANT

J.P. MANDIBURU

P. PETITJEAN

J.P. PHARABOD

D. PIGNON

D. POUTOT

A. ROY

M. SENE

R. SENE

J. VALENTIN

J.P. VICIER

RISQUES D'ACCIDENT GRAVE

La densité de puissance dans le coeur des réacteurs de la filière à eau légère est très élevée (de 50 à 100 kW/l, soit 50 à 100 fois celle régnant dans le coeur d'un réacteur graphite-gaz). En cas de rupture d'une canalisation importante du circuit amenant l'eau dans le coeur (LOCA : loss of coolant accident, dans la terminologie américaine), on peut craindre la fusion du coeur dans les minutes qui suivent l'accident. Aussi est-il prévu d'injecter immédiatement de l'eau froide à l'aide d'un dispositif de refroidissement de secours (ECCS : emergency core cooling system). En effet, la chute des barres de contrôle arrête la réaction de fission mais la désintégration des produits de fission continue à dégager une puissance considérable (environ 5 % de la puissance thermique du réacteur) et cette puissance décroît très lentement avec le temps (1).

En cas de non fonctionnement de l'ECCS, une masse d'une centaine de tonnes entrerait en fusion et ce phénomène totalement incontrôlable pourrait entraîner la fusion de la cuve puis la rupture de l'enceinte de confinement. Un nuage radioactif se répandrait alors dans l'atmosphère, ou bien une partie du coeur pourrait, en s'enfonçant à travers la dalle, contaminer le sol et l'eau.

Un réacteur de 1 000 MWe contenant plusieurs centaines de kilogrammes de plutonium et environ 2 tonnes de produits de fission et d'isotopes lourds dont certains hautement toxiques (voir tableau), la fuite dans l'atmosphère (gaz et aérosols) et dans les eaux d'une fraction notable de ces produits aurait des conséquences très graves. Au nombre des morts immédiats viendraient s'ajouter des maladies aiguës, des cancers, des leucémies, etc et une contamination radioactive entraînant l'évacuation pour de nombreuses années de la zone entourant le réacteur. Aux Etats-Unis, les conséquences de cet accident dit "maximal croyable" ont fait l'objet d'estimations très variées (rapport Wash 740, puis plus récemment le rapport Rasmussen dont les officiels font de vifs éloges). La validité de ces estimations est très contestée et une polémique s'est ouverte aux Etats-Unis d'Amérique depuis la publication du rapport Kendall (2).

Probabilité d'occurrence d'un LOCA

La rupture d'une canalisation importante est jugée hautement improbable, et la probabilité d'un événement rare est très difficile à calculer et les résultats des calculs présentent une grande dispersion. Un tel accident n'est pas considéré comme impossible par les experts (3). L'action conjuguée des hautes pressions (150 atmosphères), de la corrosion et d'intenses flux de neutrons entraîne une fragilisation des matériaux. Ces dernières années, des fissures ont été observées dans les canalisations de nombreux réacteurs à eau légère aux Etats-Unis, et l'incident grave le plus récent est une fissure sur la moitié de la circonférence, observée le 13 novembre 1973 dans un tuyau de 50 cm du générateur de vapeur de la centrale d'Indian Point (PWR 873 MWe) (4).

La question que l'on peut alors se poser est la suivante : en cas de perte importante de réfrigérant, l'ECCS fonctionnera-t-il ?

Fiabilité de l'ECCS

- L'ECCS n'a jamais été testé en vraie grandeur.
- Des tests faits sur une maquette, en 1971 à Idaho (U.S.A.) ont été totalement négatifs. 6 essais se sont soldés par 6 échecs, l'eau destinée à être injectée étant refoulée.
- En revanche, l'AEC annonçait un taux de fonctionnement supérieur à 99 %... Ces chiffres ne reposent sur aucune expérience : ils sont le résultat d'une simulation sur ordinateur. La disparité entre les calculs prévisionnels et les résultats des tests d'Idaho, faits d'ailleurs à une échelle très modeste, est inquiétante. Elle est due à la difficulté de simuler un événement aussi complexe que le LOCA : ébullition d'une énorme masse d'eau, turbulences, vibrations, rupture des gaines de combustible brutalement dépressurisées, réactions violentes entre l'eau et les produits de fission, etc...
- Des tests doivent être faits en 1975-76, aux Etats-Unis, sur un réacteur de 17 MWe de puissance, soit 60 fois moins puissants que les réacteurs de 1 000 MWe.

Quelle est la situation en France ?

Les responsables ne peuvent se targuer d'une longue expérience d'exploitation puisque le seul réacteur de la filière à eau légère en exploitation à ce jour est le réacteur franco-belge de Chooz (PWR Westinghouse 270 MWe). Force est donc de faire confiance à "l'expérience" américaine (5) en essayant d'améliorer les méthodes de simulation.

Au sujet de la validité de ces méthodes, on peut citer les propos du Dr Alvin Weinberg, directeur du laboratoire national d'Oak Ridge, de l'AEC, qu'on ne peut suspecter d'être opposé au développement de l'industrie nucléaire : "J'éprouve une profonde défiance à l'égard de calculs très élaborés concernant des situations très complexes, particulièrement quand les calculs ne sont pas contrôlés par des expériences en vraie grandeur. Comme vous le savez, notre confiance dans l'ECCS dépend essentiellement de la validité de programmes complexes. Il me semble que, quand les conséquences de la défaillance sont sérieuses, ... les programmes... doivent être contrôlés par des expériences dont l'échelle et le degré de complexité s'approchent de ceux du système calculé. Je crois donc... qu'il serait souhaitable de vérifier les calculs concernant l'ECCS par des expériences à grande échelle et si nécessaire, en vraie grandeur" (6).

Rappelons que la centrale de Fessenheim (850 MWe) divergera en 1975-76 quelques mois seulement après la divergence de la centrale de référence américaine et que la même incertitude subsiste au sujet de l'ECCS.

Possibilité de rupture de la cuve

Officiellement, cet événement est considéré comme impossible par les experts. Cependant, des documents tels que le rapport E.D.F. de présentation de Bugey 2-3 (cf à la fin de ce paragraphe) et le rapport fourni par le métallurgiste Alan Cottrell à la commission parlementaire d'enquête britannique sur la Science et la Technologie viennent tempérer l'optimisme officiel.

Lorsqu'une fissure dépasse une dimension critique dans une pièce métallique soumise à une contrainte, elle peut s'étendre rapidement et provoquer la rupture de la pièce. La dimension critique diminue quand la contrainte augmente ; elle dépend aussi des dimensions de la pièce et des propriétés mécaniques de la matière. La dimension critique des fissures est plus élevée

dans les matières ductiles que dans les matières fragiles.

La ductilité des aciers utilisés pour la réalisation des récipients sous pression augmente considérablement avec la température. Le métal passe d'un état "fragile" à basse température à un état "ductile" à haute température, avec une transition au voisinage de la température ambiante.

Mais l'irradiation peut faire remonter considérablement ce point de transition (100 à 200°C d'après le document E.D.F ci-après) et en cas de choc thermique dû par exemple à l'injection d'eau par l'ECCS, l'acier pourrait passer à l'état fragile.

De plus, Alan Cottrell pense que, même en l'absence de choc thermique, une rupture brutale de la cuve n'est pas à exclure.

Dans les cuves épaisses utilisées dans les PWR, les fissures peuvent atteindre la dimension critique à partir de laquelle une rupture brutale peut se produire sans qu'une fuite locale annonce la dégradation de la cuve et permette d'intervenir à temps.

La possibilité de rupture de la cuve est une des raisons qui ont motivé le refus de la filière à eau légère par les Britanniques.

Extrait du rapport E.D.F. de présentation de Bugey 2-3

4.1.3 - EXPLOITATION

Les bases de calcul sont les suivantes :

- pression de calcul = 172,4 bar,
- température de calcul : 343°C

La cuve du réacteur est capable de résister sans dommage d'une part aux contraintes mécaniques dues à l'effet de pression interne (section III ASME), ainsi qu'aux réactions transmises par les tuyauteries et les supports en fonctionnement normal, et d'autre part, aux transitoires de température et de pression envisageables à la suite d'incidents et d'accidents.

Une étude particulière a été faite pour montrer que l'injection d'eau froide du circuit d'injection de sécurité dans la cuve à la suite d'une rupture du circuit primaire n'entraîne pas de risques de rupture de la cuve.

En régime non accidentel, elle est soumise à des contraintes dues à la pression et à des contraintes thermiques qui sont entre autres dépendantes des taux de montée et de descente en température du circuit primaire. Il est particulièrement important de veiller à ce que la somme des contraintes reste inférieure aux limites admissibles lorsqu'on se trouve au-dessous ou au voisinage de la température de transition du métal (NDTT, nil ductility transition temperature). En effet, au-dessous de la température de transition, un travail faible suffit à propager une rupture, à partir d'un défaut de surface (rupture fragile). Or, il y a toujours des défauts préexistants en surface des tôles d'une cuve et des apports d'énergie, dus aux vibrations ou aux chocs thermiques et mécaniques qui doivent être absorbés par les matériaux.

Pour les aciers utilisés dans les cuves, la température de transition est inférieure à 20°C, notamment grâce à l'influence favorable du manganèse ; il n'y a donc pas de danger de rupture fragile au début de la vie de la cuve. Malheureusement, sous irradiation et pour les flux intégrés envisageables dans la vie du réacteur, la température de transition peut remonter de 100 à 200°C et se trouver dans la domaine d'utilisation de la cuve.

En fin de vie, on pourrait être amené à réduire les taux de montée et de descente en température (aux basses températures, c'est-à-dire lors des démarrages et arrêts), de façon à rester dans le domaine de sécurité (contrainte-température) des viroles du coeur, les contraintes dues à la pression ne pouvant être annulées compte-tenu de la nécessité de pressuriser pour laisser une marge de sécurité vis-à-vis de la cavitation à l'aspiration des pompes primaires.

Pendant l'exploitation de la centrale, huit porte-échantillons sont placés entre écran-thermique et cuve, ils permettent d'irradier des éprouvettes de traction et de résilience à la même température que la cuve et à une fluence légèrement plus grande, ce qui permet d'établir au cours de vie et à l'avance le domaine de sécurité évoqué ci-dessus, ainsi que de prévoir à quelle température doivent être effectués les essais hydrauliques ultérieurs.

Notes

(1) Quelques secondes après la chute des barres, la puissance W décroît en fonction du temps t selon la loi $W = cte \times t^{-1/5}$

(2) Ce rapport rédigé par un groupe de scientifiques américains de l'Union of Concerned Scientists critique vivement les méthodes et les hypothèses de calcul du rapport Rasmussen.

(3)-Un récent accident survenu dans le métro de Londres a fait plusieurs dizaines de morts et de blessés alors qu'il était considéré comme impossible.

- L'usage intempestif d'une bougie a déclenché un grave incendie qui a duré sept heures dans la centrale américaine de Browns Ferry. 2 tranches de 1 000 MWe ont été arrêtées (mars 1975). Quelle était la probabilité d'un tel événement ?

(4) Cité par Lovins dans sa déposition devant "The Select Committee on Science and Technology".

(5) La première centrale à eau légère d'une puissance supérieure à 1 000 MWe a divergé en juin 1973 aux Etats-Unis (Zion 1 PWR 1050 MWe). Au 1er janvier 1974, l'expérience américaine portait sur 41 années-réacteurs de la filière à eau légère d'une puissance supérieure à 250 MWe et sur 1,3 année-réacteur de puissance supérieure à 1 000 MWe.

(6) Cité par Amory Lovins (note 4)

Tableau - Le tableau qui suit donne un ordre de grandeur des quantités de quelques produits de fission et transuraniens contenus dans 30 tonnes de combustible enrichi à 3,5 % en uranium 235 et "brûlé" à un taux de 33 000 mégawatts par jour et par tonne.

(1e MWj est la quantité d'énergie dégagée par la fission complète de 1 g d'uranium 235).

Elément	Demi-vie (ans)	Quantité au déchar- gement	Après 10 ans kg	Après 100 ans kg	Après 1 ans kg
Strontium 90 ^a	28	2,3.10 ⁶ Curie	16 kg	12	1,9
Césium 137	30	3.10 ⁶ Curie	35 kg	29	3,5
Iode 129	17 mil- lions	1 Curie	6 kg	6	6
Plutonium ^b					
238	86		7 kg		
239	24 000		250 kg		
240	6 600		80 kg		
241	13		40 kg		
242	380 000		15 kg		

Pour obtenir le contenu du coeur du réacteur, on multiplie ces quantités par un facteur voisin de 2.

a) évacuation des déchets radioactifs AIEA - Paris 1972 OCDE page 22

b) EPA 520/4-73-002 (AEC)

1,5 % du plutonium et 80 à 90 % des transuraniens passent dans les déchets (référence a page 25). Les transuraniens restants dans les déchets ont des périodes très longues et le taux de décroissance de la radioactivité est illustré par le tableau suivant :

Activité totale des actinides contenus dans les déchets en millions de Curies (USA) (Physics Today août 1973)				
an 2000	après 1000 ans	après 10 000 ans	après 100 000 ans	après 1 million d'années
1 650	35	10,4	1,27	0,82

Toxicité

On peut comparer les chiffres précédents aux données suivantes.

Strontium 90 (organe critique : le squelette)

La concentration maximale admissible a été fixée à 2 milliardièmes de gramme par mètre cube dans l'eau (CMA eau) et à 7 milliardièmes de gramme par mètre cube d'air (CMA air).

La quantité maximale admissible pour la totalité du corps est de 14 milliardièmes de gramme (IAEA TR N° 152 1974 page 61).

Les CMA sont la plupart du temps fixées à partir de modèles théoriques et non de résultats expérimentaux. Il est très difficile d'établir un lien entre la quantité de produits inhalés ou ingérés et le déclenchement d'un cancer au niveau de l'organe critique.

Plutonium 239

CMA eau (public) 0,1 millième de gramme par mètre cube

CMA air (travailleurs) 30 milliardièmes de gramme par mètre cube

Quantité maximale admissible pour la totalité du corps : 0,7 milliardième de gramme (IAEA TR N° 152).

De récentes expériences américaines faites sur des chiens montrent qu'au-delà de 70 milliardièmes de gramme inhalés en aérosols un cancer du poumon se développait chez 90 % des sujets.

Pour la plupart des transuraniens, la CMA est voisine de 1 milliardième de Curie par mètre cube. Cette valeur correspond à 2 milliardièmes de gramme d'Américium 241, 0,1 milliardième de gramme de Curium 244 ou 5 milliardièmes de gramme de Neptunium 237.

Les réacteurs surrégénérateurs à neutrons rapides

Le rapport d'Ornano comporte en bonne place la phrase très rassurante que voici : "On notera tout d'abord qu'il est physiquement impossible à un réacteur nucléaire d'exploser comme une bombe atomique" (1). Malheureusement, c'est pour le moins une inexactitude, comme en témoigne la phrase suivante extraite d'un bulletin du C.E.A. concernant les réacteurs à neutrons rapides : "La matière fissile se présente sous une forme très concentrée et le risque de réarrangement de l'oxyde mixte d'uranium et de plutonium avec formation d'une masse surcritique doit être considéré" (2, page 85).

Il convient ici d'entrer plus avant dans l'explication du fonctionnement d'un réacteur nucléaire. Tant que le coefficient de multiplication (rapport du nombre de neutrons d'une génération au nombre de neutrons de la génération précédente) est très peu différent de l'unité, la réaction en chaîne est gouvernée par les "neutrons retardés" et assez facilement contrôlable. A ce point de vue, les réacteurs à neutrons rapides ne diffèrent pas notablement des réacteurs à neutrons lents. Mais dès que le coefficient de multiplication dépasse un certain seuil, nommé "seuil surcritique prompt", le temps de doublement (temps que met la puissance pour doubler) devient en gros proportionnel au "temps de vie" des neutrons (3, pages 119-121). Or le temps de vie dans un réacteur à neutrons rapides est d'environ 1 dix-millionième de seconde (3, page 119) beaucoup plus proche du temps de vie dans la bombe atomique (1 milliardième de seconde) (4) que du temps de vie dans un réacteur à neutrons rapides (1 dix-millième à 1 millième de seconde) (3, page 119). Il en résulte que, lors d'un accident faisant franchir le seuil surcritique prompt, le temps de doublement d'un réacteur à neutrons rapides pourra descendre jusqu'à 1 dix-millième de seconde environ, contre 0,1 à 1 seconde pour un réacteur à neutrons lents. Avec un temps de doublement d'un dix-millième de seconde, la puissance est multipliée par 2 à la puissance 10, soit 1024 ou une milliseconde. Cela montre le caractère explosif de l'accident typique des réacteurs à neutrons rapides, pudiquement appelé "excursion nucléaire" (2, page 90) et qui n'est autre qu'une explosion atomique à mauvais rendement.

Comme il est donc physiquement possible à un réacteur à neutrons rapides d'exploser comme une bombe atomique, le problème est d'évaluer la puissance de l'explosion. Or cette évaluation ne peut être que le résultat d'un calcul très complexe sur ordinateur, qui devrait tenir compte de la disposition hétérogène réelle à trois dimensions du réacteur (combustible, gaines, sodium réfrigérant) et faire intervenir la neutronique, la mécanique et la thermodynamique. Si l'on se rappelle les difficultés du calcul de l'explosion d'une structure pourtant beaucoup plus simple, à savoir celle de la bombe atomique, et le nombre d'expériences qui ont été nécessaires pour la mettre au point, on ne peut qu'être très sceptique au sujet des résultats actuellement présentés quant à l'équivalent de l'excursion nucléaire en explosifs classiques (quelques dizaines de tonnes ce qui n'est déjà pas mal). Ces résultats ont été obtenus à l'aide de codes de calcul comportant de nombreuses hypothèses simplificatrices, et surtout ne sont pas étayés par une base expérimentale suffisante. En effet, Super-Phénix comportera environ 4 tonnes de plutonium, et les expériences d'excursion nucléaire n'ont jamais concerné des quantités de l'or-

dre de la tonne ou même de la centaine de kilogrammes de plutonium. Pour des raisons de prudence bien compréhensibles, les essais de résistance de la cuve sur maquette effectués pour Super-Phénix (2, page 90) l'ont été... avec des explosifs classiques. Ce qui ne permet absolument pas de tester la validité des calculs pour la partie nucléaire de l'explosion.

Les enceintes de confinement prévues sont sujettes à fissuration et fragilisation au cours du temps (vieillissement et irradiation). Même si les calculs pouvaient être vérifiés par des essais en vraie grandeur effectués avec des maquettes métalliques neuves, cela ne prouverait pas que les enceintes réelles pourraient encore résister au bout d'un certain temps. De plus, les enceintes comportent des passages (pour les circuits de sodium et le chargement-déchargement) et n'offrent donc pas une étanchéité à toute épreuve.

Il est clair qu'étant donné l'extraordinaire toxicité radioactive du plutonium 239 en aérosol, l'expulsion même partielle des 4 tonnes de plutonium de Super-Phénix dispersées par l'excursion nucléaire, constituerait une catastrophe sans précédent (la dose à partir de laquelle se développe un cancer du poumon est estimée entre un microgramme et un milligramme) (5, 6).

Plusieurs types d'incident peuvent malheureusement conduire à l'excursion nucléaire dans un réacteur surrégénérateur. Citons : le compactage provoqué par des vibrations ou une explosion, accidentelle ou provoquée, une fusion partielle du cœur due à l'interruption du refroidissement par le sodium, l'éjection d'une ou plusieurs barres de contrôle sous la poussée du sodium primaire (2, page 86). Dans un réacteur à neutrons rapides, en raison de l'absence de modérateur, la fusion partielle du cœur peut accélérer ou provoquer la réaction en chaîne, alors que dans un réacteur à neutrons lents une telle fusion arrête la réaction en chaîne par destruction de la structure ordonnée et précise nécessaire à cette réaction.

En plus de cette possibilité d'explosion atomique, les réacteurs surrégénérateurs refroidis au sodium liquide présentent les défauts inhérents au sodium : impossibilité d'éteindre un feu de sodium de plus de quelques centaines de kilogrammes, possibilité de déflagration sodium-eau (accident du réacteur soviétique BN 350 en 1974).

L'attitude des pays étrangers vis-à-vis des surrégénérateurs est une grande prudence. Les Etats-Unis ont été défavorablement impressionnés par la fusion partielle du surrégénérateur Enrico Fermi (1966) qui avait failli conduire à la formation d'une masse surcritique. Ils hésitent à lancer la filière des surrégénérateurs (7). Les Britanniques et les Soviétiques ont construit leurs centrales de démonstration (l'équivalent de Phénix) dans des zones à très faible densité de population (respectivement Dunreay au nord de l'Ecosse, et Chevtchenko, au nord-est de la mer Caspienne). Seuls les technocrates français n'hésitent pas à implanter ces réacteurs à proximité de villes importantes (Avignon et Nîmes pour Phénix, Lyon pour Super-Phénix).

Références

- (1) rapport de M. Michel d'Ornano, Ministre de l'Industrie et de la Recherche du 15/11/74, paragraphe 2.33
- (2) Commissariat à l'Energie Atomique, Bulletin d'Informations Scientifiques et Techniques n° 182, juin 1973
- (3) Michel Soutif, Physique Neutronique, Presses Universitaires de France, 1962

- (4) Encyclopedia Universalis, volume 11, Armement Nucléaire
- (5) Bair, Toxicology of Plutonium, Advances in Radiation Biology, Volume 4, 1974 (Academic Press)
- (6) Bair, Richmond, Wachholz, Rapport de l'US AEC Wash 1320, septembre 1974, Radiobiological Assessment of the Spatial Distribution of Radiation Doses from Inhaled Plutonium
- (7) US Senate Hearings before the Subcommittee on Reorganization Research and International Organisation, témoignage de Daniel F. Ford, 4, 5 et 10 décembre 1973.

Les déchets et les produits de fission

Les déchets et les produits de fission sont des sous-produits inévitables de l'industrie nucléaire.

Les déchets de faible et moyenne activité sont constitués essentiellement par des éléments contaminés (filtres, gants, résines, éléments des réacteurs, etc...) et par certains résidus liquides du cycle de retraitement. Les déchets de haute activité sont constitués par les gaines des éléments combustibles et par les produits de fission mêlés aux actinides dont le plutonium.

A condition de ne pas être exposés aux eaux de ruissellement ou de ne pas être immergés dans les océans (1), les déchets de faible et moyenne activité présentent à moyen terme un risque moins grand que les déchets de haute activité. Par contre, leur volume est considérable (plusieurs centaines de mètres cubes par an pour un réacteur de 1 000 MWe), ils contiennent des émetteurs α (2), et leur conditionnement n'est pas des plus sûrs: risques de fissurations et taux élevé de lixiviation des bétons (3), risques d'incendie des bitumes (4).

Pour les déchets de haute activité, il convient de distinguer les problèmes posés à court terme par le retraitement et le conditionnement des déchets et des produits de fission, et les problèmes posés à long terme par leur stockage. En ce qui concerne le court terme, il n'existe à ce jour ni en Europe ni aux Etats-Unis aucune unité de capacité industrielle pour le retraitement des combustibles de la filière à eau légère. Les difficultés rencontrées par les constructeurs dans le monde entier tant sur le plan technique que sur le plan de la sécurité devraient inciter à la prudence (5). De même, le conditionnement dans des blocs de verre n'a pas encore fait l'objet d'un développement à l'échelle industrielle (6). Sur ces deux points, le programme gouvernemental comporte donc un pari basé sur l'extrapolation à la série industrielle de résultats obtenus sur les prototypes.

Mais à long terme, des difficultés plus fondamentales sont liées aux problèmes du stockage. Si son développement industriel est possible, le conditionnement dans des blocs de verre entourés d'une paroi métallique constituerait un progrès par rapport au confinement des liquides dans des réservoirs (réduction de volume et diminution à court terme des risques de contamination de l'environnement en cas de fissuration de l'enveloppe métallique). Mais il ne s'agit que d'une solution d'attente et non d'une solution absolument sûre à long terme.

En effet, les produits de fission ne peuvent être séparés totalement des transuraniens (plutonium, curium, américium, etc). Or ces derniers exigent une tenue du dispositif de conditionnement sur des durées de plusieurs centaines de milliers d'années et la désintégration des produits de fission dégage une énergie considérable (7) ce qui compromet la tenue des verres à long terme. Dans un premier temps, la surveillance et le refroidissement énergétique des déchets sont nécessaires. Ce n'est qu'après une décroissance suffisante de l'activité qu'un stockage qualifié de "définitif" est envisagé.

Or la tenue à long terme des verres sous irradiation et l'étanchéité des formations géologiques choisies pour le stockage sont totalement inconnues sur de telles échelles de temps.

THE HISTORY OF THE UNITED STATES OF AMERICA

The history of the United States of America is a story of growth, struggle, and achievement. From the first European settlements to the present day, the nation has evolved through a series of challenges and triumphs. The early years were marked by the struggle for independence from British rule, a fight that culminated in the signing of the Declaration of Independence in 1776. The new nation then faced the task of building a government that could unite the diverse states and peoples of the continent. This led to the drafting of the Constitution in 1787, which established the framework for the federal government and the rights of the citizens.

The 19th century was a period of rapid expansion and change. The westward movement of settlers led to the acquisition of vast new territories, but it also brought the issue of slavery to the forefront of national debate. The Civil War, fought between 1861 and 1865, was a pivotal moment in the nation's history, as it resolved the issue of slavery and preserved the Union. The war led to the passage of the Reconstruction Amendments, which guaranteed the rights of all citizens, regardless of race or ethnicity.

The 20th century has been a time of unprecedented progress and innovation. The United States emerged as a global superpower, leading the world in science, technology, and culture. The Great Depression of the 1930s and the Second World War of the 1940s tested the nation's resilience, but it also led to the creation of the New Deal and the establishment of the United Nations. The civil rights movement of the 1950s and 1960s fought for equality and justice for all, leading to the passage of landmark legislation such as the Civil Rights Act of 1964.

Today, the United States continues to face new challenges and opportunities. The rise of the internet and globalization have transformed the way we live and work, while the challenges of climate change and terrorism require a new approach to governance. Despite these challenges, the United States remains a land of hope and possibility, a nation that has the power to shape the future of the world.

En ce qui concerne le premier point, il est illusoire d'extrapoler à partir de résultats obtenus en laboratoire avec des matériaux soumis à de fortes irradiations pendant quelques années, le comportement des mêmes matériaux, notamment la migration des ions radioactifs, la fissuration et la lixiviation des blocs, dans des conditions d'irradiation plus faible mais sur des durées de plusieurs centaines de milliers d'années (8). Quant au deuxième point, si la plasticité des formations salines ou argileuses (9) les rend peu sensibles aux conséquences d'éventuels séismes, leur étanchéité absolue ne peut être garantie.

La thèse avancée est que, dans les formations argileuses, l'eau est stagnante et le pouvoir d'absorption des radionucléides est élevé. Or les argiles peuvent être le siège de lessivages, qui, après échange d'ions, entraînent les radioéléments. Et dans les formations salines, le risque de corrosion par les saumures chauffées (10) puis de diffusion dans le sel, n'est pas négligeable.

Le stockage des déchets dans les formations géologiques risque donc d'entraîner une contamination irréversible des sols et des eaux par des produits hautement toxiques.

D'autres "solutions" sont parfois évoquées :

- l'envoi des déchets dans l'espace (11)
- l'enfouissement dans la croûte terrestre grâce au glissement des plaques, après immersion dans les fosses profondes des océans

- la possibilité de reprendre les éléments à longue période et de transmuter les produits de fission les plus toxiques (12).

Pour évaluer le réalisme de la première proposition, rappelons que chaque tranche de 1 000 MWe produira annuellement plusieurs centaines de kilogrammes de produits de fission et d'actinides solides (13) et environ 20 mètres cubes de déchets de haute activité provenant des gaines, auxquels il faudra ajouter les déchets des usines de fabrication des éléments combustibles contenant du plutonium, soit environ 600 mètres cubes pour une charge de 30 tonnes de combustible (14) et qu'indépendamment des considérations économiques, on n'est pas à l'abri d'accidents au décollage des fusées.

Des géologues émettent des doutes sur le bien-fondé de la deuxième proposition. Ils craignent qu'à la zone de convergence des plaques, les perturbations n'entraînent un retour cyclique des déchets après broyage. Ceci entraînerait une contamination du milieu marin et compromettrait l'exploitation des ressources sur lesquelles on fonde par ailleurs beaucoup d'espairs.

Quant à la troisième solution, elle suppose que l'on utilisera des "réacteurs-poubelles" ou que le développement industriel de la fusion viendra à temps pour nous débarrasser des déchets de la fission. Ce procédé est loin d'être au point et des doutes sont émis sur la possibilité de le réaliser même en laboratoire. Envisager sa mise en oeuvre à l'échelle industrielle relève pour l'instant de la science-fiction.

En conclusion, il n'existe actuellement aucune solution technique au problème de l'élimination des déchets radioactifs. La seule possibilité reste la surveillance pendant des millénaires de stocks qui iront en augmentant de façon considérable (15) si le développement massif de l'électronucléaire est maintenu. On peut toujours espérer que les hypothétiques progrès de la technique apporteront des solutions. Cela relève de l'acte de foi et non d'une attitude scientifique.

- (8) Des expériences sont faites notamment avec du plutonium 238 dont l'activité est égale à 300 fois celle du plutonium 239 et dont la période est de 89 ans au lieu de 25 000 ans pour le second. Communication de M. Y. Sousselier, CEA à la journée organisée le 12 avril 1975 à la Faculté de Sciences de Jussieu.
- (9) - Evacuation des déchets radioactifs, compte-rendu de la réunion d'information de l'AEN, Paris 1972, page 193
- Maturité de l'énergie nucléaire, page 255, 3-2-2.
- (10) Rappelons que même au bout d'un siècle, la densité de puissance dans les blocs de verre serait encore importante.
- (11) "Les déchets radioactifs" par Y. Sousselier (CEA), Annales des Mines, janvier 1974. Auparavant, il faudrait conditionner ces déchets donc augmenter leur poids de façon considérable.
- (12) Voir par exemple "Vues et perspectives sur l'énergie nucléaire de fission et de fusion et considérations sur les risques associés", par D. Breton (CEA) Annales des Mines, janvier 1974.
- (13) Voir tableau de l'annexe "Risques d'accident grave".
- (14) Voir note (11)
- (15) Prévision 1985 concernant les déchets haute activité :
Etats-Unis : tonnage non retraité 6 320 tonnes (ces besoins correspondant aux réacteurs engagés en juillet 1974)
Japon : stocks en attente ou à évacuer à l'étranger 4 000 tonnes
Europe : besoin à satisfaire 3400 tonnes
"Le retraitement des combustibles se trouve présentement affronté à des graves difficultés dont l'ampleur est telle qu'elles débouchent inévitablement sur une crise d'importance mondiale" J. Couture, CEA, référence (5)

