

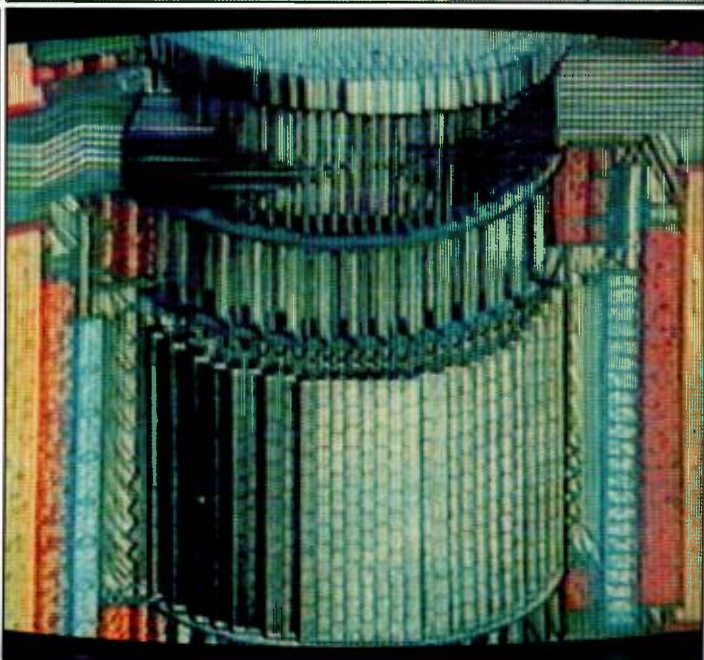
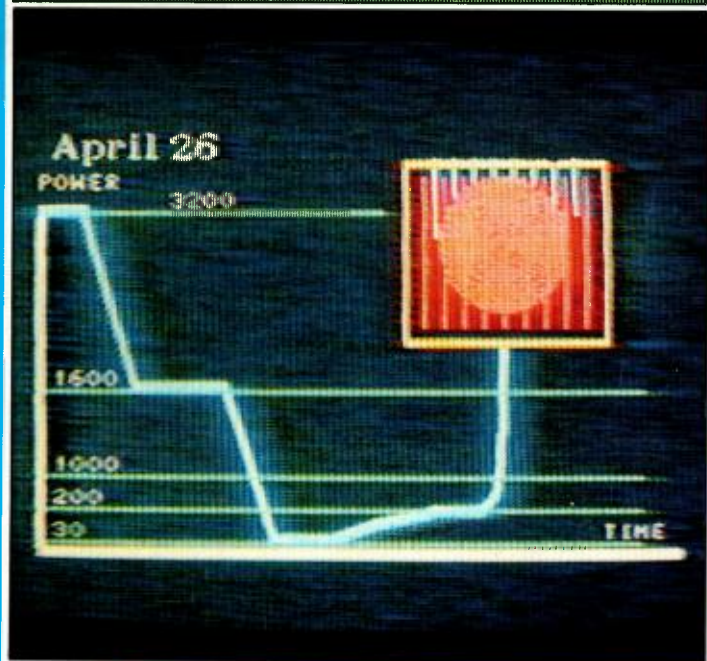
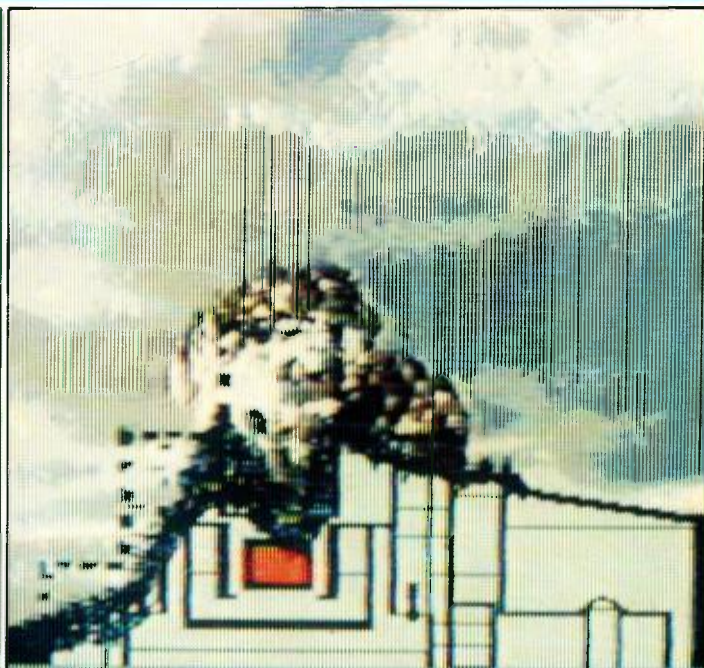
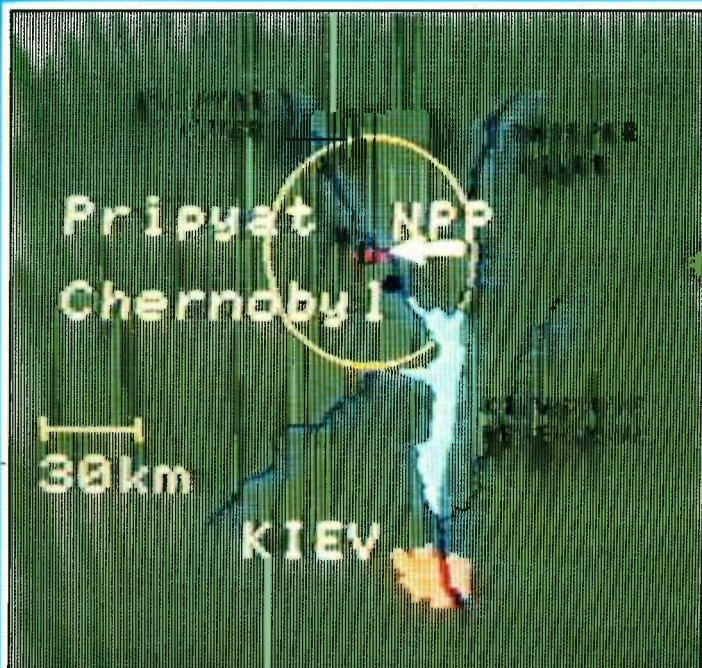


INSTITUT DE PROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

L'ACCIDENT de TCHERNOBYL

Rapport IPSN 2/86

revision 3



octobre 1986

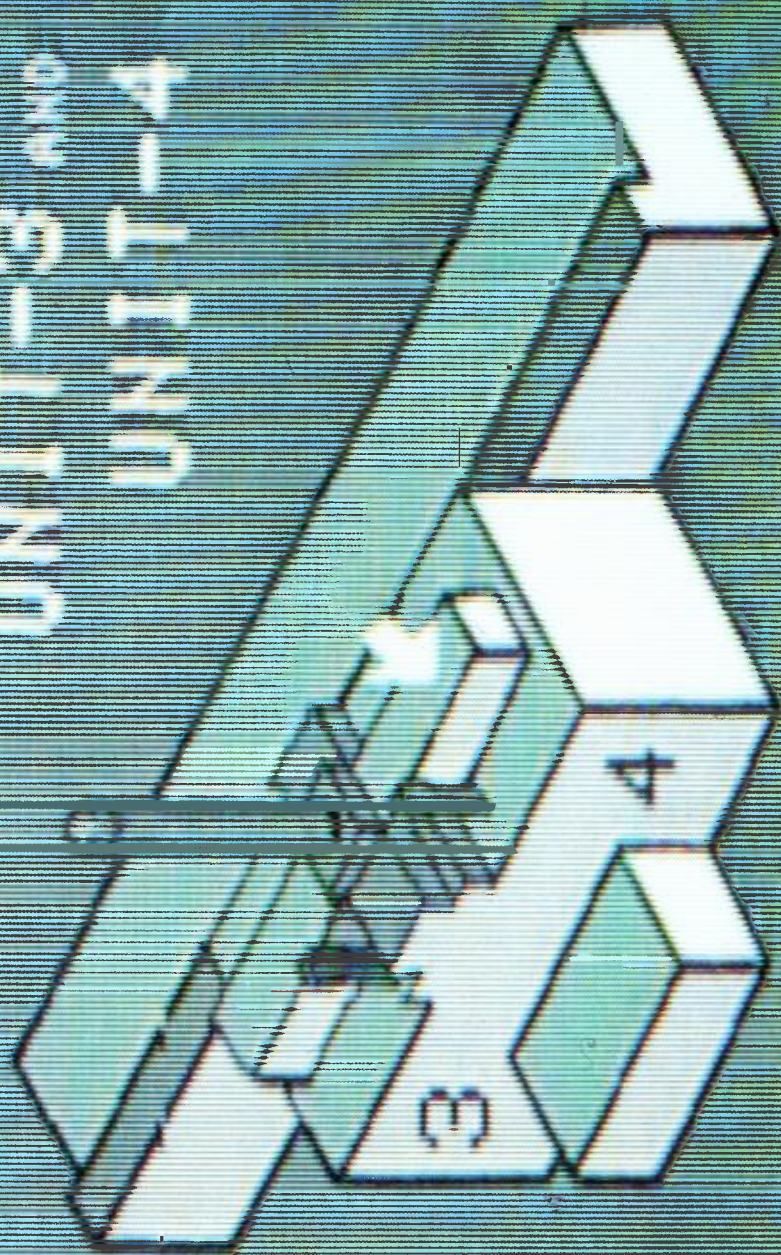
cea

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

Chernobyl NPP

UNIT-3

UNIT-4



SOMMAIRE

	Page
1. INTRODUCTION	1
2. LES REACTEURS RBMK	5
2.1. La filière RBMK	5
2.2. La centrale nucléaire de Tchernobyl	5
2.3. Le réacteur RBMK	6
2.4. Le contrôle du réacteur	7
2.4.1. Les systèmes de contrôle et protection	8
2.4.2. Le système de surveillance de la distribution de puissance	9
2.4.3. Le calculateur d'aide au pilotage	10
2.5. Les systèmes de protection et de sauvegarde	10
2.5.1. Dimensionnement des systèmes de protection du RBMK	10
2.5.2. Dimensionnement des systèmes de sauvegarde	11
2.6. Le confinement	13
2.6.1. La cavité cœur du réacteur	13
2.6.2. Le confinement modulaire	14
2.6.3. Les vannes d'isolement	15
2.6.4. La piscine de suppression de pression	16
2.6.5. Le système de traitement d'hydrogène	16
2.6.6. Le système de radioprotection	17
2.6.7. Les rejets en fonctionnement normal	17
2.6.8. Les rejets gazeux en cas d'accident	18
3. LE SCENARIO DE L'ACCIDENT	35
Annexes du chapitre 3.	47
4. LES CAUSES DE L'ACCIDENT	55
5. L'INTERVENTION ET LES CONSEQUENCES SUR LE SITE ET L'ENVIRONNEMENT	57
5.1. Le confinement du réacteur	57
5.1.1. Les interventions immédiates	57
5.1.2. La limitation des conséquences sur le cœur	58
5.1.3. Le sarcophage du réacteur	58
5.2. L'évacuation des populations	59
5.3. La restauration des sols et espaces contaminés	59
5.4. La protection de la nappe	60
6. ESTIMATION DU TERME SOURCE	63
6.1. Inventaire du cœur du réacteur	63
6.2. Emission de produits de fission lors de l'accident	63
6.3. Situation météorologique les premiers jours de l'accident	64
6.4. Surélévation des rejets	65
6.4.1. Présentation du problème	65
6.4.2. Résultats des calculs de surélévation	65
6.5. Trajectoires calculées	66
6.6. Mesures de radioactivité effectuées en Europe - Concordance avec les trajectoires	67

6.7. Coefficients de transfert atmosphérique à longue distance	67
6.8. Evaluation du rejet durant les deux premiers jours	68
6.8.1. Comparaison des activités surfaciques calculées et mesurées	69
6.8.2. Estimation du rejet pour les autres familles de produits de fission	70
6.9. Synthèse	70
6.9.1. Terme source	70
6.9.2. Mesures dans l'environnement	71
6.9.3. Débits de dose et doses à proximité du site	72
6.9.4. Elévation des rejets et trajectoires	72
7. LES MESURES DE RADIOACTIVITE	89
7.1. Mesures en Europe du 28 avril au 12 mai 1986	89
7.2. Mesures effectuées en France par le groupe C.E.A.	90
7.2.1. Mesures atmosphériques	90
7.2.2. Mesures de dépôts	90
7.2.3. Mesures sur la chaîne alimentaire	90
8. LES CONSEQUENCES SANITAIRES	111
8.1. Exposition au milieu physique en France	111
8.1.1. Méthode utilisée pour l'exploitation des résultats	111
8.1.2. Calcul des doses et presentation des résultats	111
8.2. Exposition due à l'ingestion	113
8.2.1. Produits animaux	113
8.2.2. Produits végétaux	113
8.3. Discussion	115
8.3.1. Mesures	115
8.3.2. Interprétation	115
8.4. Conclusions	116
9. LES CONSEQUENCES MEDICALES	129
9.1. Les problèmes médicaux	129
9.2. Les problèmes sanitaires	130
9.3. Effets à long terme	131
9.4. Environnement	132
Annexe : Rappel	135
ANNEXE : Site de la centrale de Tchernobyl	137
1. Situation générale du site	137
2. Environnement industriel et voies de communication	138
3. Populations	138
4. Climatologie	139
5. Géologie	140
6. Sismologie	141
7. Hydrogéologie	141
8. Hydrologie	142
9. Economie rurale	143
10. Références	144
BIBLIOGRAPHIE	163

1. – INTRODUCTION

1.1. Cette nouvelle, et probablement dernière, révision du rapport IPSN sur l'accident de **Tchernobyl** diffère des précédentes versions sur un point essentiel : celles-ci tentaient de deviner, à travers des informations éparses, ce qui avait pu se passer dans le réacteur 4 de cette centrale. Depuis, l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) a réuni à VIENNE du 25 au 29 août, plus de 300 experts scientifiques et techniques pour prendre connaissance d'un document russe de 400 pages et discuter avec des experts scientifiques russes à haut niveau de tous les aspects de l'accident survenu le 26 avril 1986 à la centrale de **Tchernobyl**. Après cette réunion, un groupe d'experts constitué autour du Groupe Consultatif International sur la Sécurité Nucléaire (INSAG) a rassemblé en un document (réf. : AIEA N° 75-INSAG-1) les principales informations données, et les enseignements qu'on pouvait en tirer.

1.2. Bien que toutes les questions posées n'aient pu obtenir de réponses détaillées faute de temps (les Soviétiques se sont engagés à y répondre par écrit dans les semaines à venir), les renseignements fournis sont très importants et permettent aujourd'hui de se faire une idée précise des causes de l'accident, de son déroulement, des conséquences médicales, sanitaires, écologiques, de la gestion de la crise en URSS, des travaux engagés pour limiter les conséquences et récupérer le site et les zones évacuées, des modifications déjà envisagées pour améliorer la sûreté des RBMK.

1.3. Le scénario de l'accident est maintenant bien établi ; le chapitre 3 du présent rapport en donne une chronologie commentée jusqu'à l'explosion finale. On notera cependant qu'une grande part de ce scénario a été reconstruite par calculs, faute de disposer des enregistrements utiles, tous les moyens d'enregistrement ayant été utilisés pour relever les paramètres de l'essai prévu, non ceux du réacteur.

Un essai électrique mal préparé, conduit sans tenir aucun compte de l'état du réacteur, une méconnaissance surprenante de la part des opérateurs non seulement des règles élémentaires de sûreté et des procédures, mais également de la physique (neutronique, thermique, thermohydraulique) et des caractéristiques particulières de ce type de réacteur, un personnel voulant réaliser aussi rapidement que possible les essais prévus, telles sont les principales raisons de cet accident, avancées par les experts russes eux-mêmes. L'INSAG, dans son document écrit du 2 au 6 septembre à la suite de la réunion de Vienne, note : "Les erreurs et violations de procédures furent les facteurs majeurs conduisant à cet accident. Cette série de violations délibérées, si extraordinaires qu'elles soient, en relation avec les caractéristiques spécifiques du concept de réacteur RBMK et de son fonctionnement à basse puissance, a conduit au désastre".

1.4. Les rejets de produits radioactifs dans l'atmosphère ont duré pour l'essentiel dix jours (jusqu'au 10 mai), mais se poursuivaient encore fin août à raison de quelques Curies par jour. Environ 200 millions de Curies représentant près de 10 % de l'inventaire du cœur au moment de l'explosion ont ainsi été rejetés : 100 % des gaz rares, 15 à 20 % des produits volatils (I, Cs, Te), 3 à 5 % des produits non volatils et des transuraniens (Np 239, Pu, Cm) ; ces valeurs estimées par les Russes sont très proches des estimations effectuées par l'IPSN en mai-juin. La longue durée de ces rejets explique la répartition très inhomogène des dépôts au sol, les directions et vitesses de vent ayant considérablement varié, ce qui a encore compliqué la tâche au plan sanitaire.

1.5. Très rapidement après l'explosion les premières mesures médicales et sanitaires ont été prises en exécutant très certainement un plan d'urgence prévu pour des explosions à niveaux élevés telles qu'on peut les rencontrer lors d'un accident grave dans une installation nucléaire importante ou après l'explosion à faible altitude d'une arme nucléaire.

L'intervention médicale a été réalisée dans un double but. D'une part il a fallu trier, hospitaliser rapidement et traiter plus de 200 irradiés graves et, d'autre part des examens systématiques ont été pratiqués sur près de 250 000 personnes, bien que les doses absorbées n'aient pas entraîné de conséquences nécessitant une action médicale.

Les 200 irradiés graves ont été pris en charge très rapidement par l'équipe médicale de la Centrale et par les deux équipes d'urgence venues de **Pripyat** en moins d'une demi-heure. Une "check-list" très simple, concernant toutes les questions nécessaires pour poser un diagnostic, a été remplie sur place pour chacun d'entre eux. Un tri a été effectué et les irradiés répartis entre un hôpital à **Kiev** et l'hôpital spécialisé de **Moscou**.

Les examens complémentaires nécessaires pour poser l'indication thérapeutique ont été rapidement réalisés et l'évacuation sur les deux hôpitaux a été effectuée le premier jour malgré la présence d'un taux très élevé de contamination superficielle.

C'est la responsable du Service de **Moscou**, Mme GOUSKOVA, qui a eu la responsabilité de tous les irradiés hospitalisés à **Moscou** ou à **Kiev**.

Les thérapeutiques utilisées étaient classiques. La greffe de moëlle a été inefficace et s'est révélée dangereuse dans certains cas. Les transfusions sélectives, telle qu'on les pratique à l'hôpital Curie, se sont révélées très efficaces et sans risques.

Les brûlures cutanées, souvent très étendues, ont posé des problèmes sérieux qui n'avaient encore jamais été rencontrés.

Des examens médicaux systématiques ont été pratiqués sur 250 000 personnes vivant dans la région de la Centrale. Bien qu'il n'y ait pas eu en réalité une nécessité pour agir ainsi, ces examens, dont les résultats ne pouvaient qu'être négatifs ont contribué à tranquilliser les populations. En outre on a systématiquement mesuré la charge en iode des thyroïdes.

1.6. Sur le plan sanitaire, le déroulement de l'accident a posé des problèmes dont la solution n'avait pas été prévue. Comme partout on avait implicitement admis un accident de courte durée. Or le réacteur de **Tchernobyl** a rejeté de fortes activités de radionucléides pendant 10 jours, temps pendant lequel les conditions météorologiques ont considérablement évolué, entraînant de nouvelles contaminations de l'environnement.

Afin de suivre l'évolution des doses et pour prendre les mesures d'évacuation nécessaires, on a utilisé la technique militaire des courbes d'isodoses mesurées soit par des avions soit par des hélicoptères ; quelques prélèvements d'air ont permis de corrélérer les doses et les spectres de radio-isotopes permettant ainsi de faire des évaluations sanitaires rapides suffisamment précises. C'est de cette façon qu'ont été décidés puis réalisés les confinements et les évacuations.

Un programme très important de surveillance de la chaîne alimentaire a été mis en route. Des limites de radioactivité ont été fixées pour respecter les doses admissibles. Le taux de contamination des sols est tel que dans de nombreux cas ces limites ont été dépassées. Aussi un programme de mesure de la radioactivité corporelle de la population a été entrepris. Ce programme permettra seul de faire des estimations valables sur les effets probables à long terme car les premières mesures ont déjà révélé que les paramètres choisis pour les modèles sanitaires surestimaient les doses d'un facteur qui atteint dans certains cas un ordre de grandeur.

Les soviétiques ont montré qu'ils savaient décontaminer les bâtiments, les sols et les terres agricoles. Ils possèdent également des données qui leur permettent aujourd'hui de prévoir le devenir des territoires contaminés et de mettre en route les mesures qui en permettront la récupération la plus rapide possible. Ce n'est que dans le voisinage immédiat de la Centrale que les doses sont suffisantes pour entraîner une atteinte du milieu.

Enfin des programmes à caractère scientifique ont déjà été décidés dans les domaines médicaux et environnementaux.

Il semble bien qu'un accident d'une telle ampleur avait été considéré comme possible, que les mesures à prendre pour l'homme et l'environnement avaient été prévues et que les plans ont pu être rapidement adaptés aux problèmes spécifiques posés par l'explosion et l'incendie de la Centrale de **Tchernobyl**.



2 – LES REACTEURS RBMK

2.1. LA FILIERE RBMK

La première centrale nucléaire d'Union Soviétique a été construite à **Obninsk** à partir de 1950. Elle a été mise en service le 27 juin 1954 ; c'était la première centrale nucléaire du monde. Les "piles" construites aux Etats-Unis depuis 1942 ne produisaient pas d'électricité. Ce réacteur d'**Obninsk**, à tubes de force, à uranium et graphite est l'ancêtre de la filière des réacteurs RBMK dont le plus connu, **Tchernobyl 4**, a explosé le 26 avril 1986 à 1 h 23' 45".

Deux réacteurs de la même filière ont été ensuite construits à **Beloyarsk** ; le premier, d'une puissance de 100 MWe, couplé au réseau en avril 1964, a été arrêté définitivement à la fin de 1982 ; le deuxième d'une puissance de 200 MWe, a été couplé au réseau à la fin de 1967. Ces réacteurs produisent de la vapeur surchauffée. Dans les années 1950, l'accent a été mis sur les performances thermodynamiques, dans le but de se rapprocher des caractéristiques de la vapeur des centrales classiques ou de les dépasser. Pour atteindre ce but, les éléments combustibles ont été gainés d'acier inoxydable et sont tubulaires.

Les arguments concernant l'économie du cycle du combustible se sont ensuite imposés. Le zirconium a remplacé l'acier comme matériau de gainage et la taille des réacteurs a augmenté. Le premier RBMK de 1000 MWe a été couplé au réseau en septembre 1973 à la centrale de **Leningrad**. Quatorze réacteurs RBMK 1000 ont été mis en service depuis cette date, quatre à **Leningrad**, quatre à **Kursk**, quatre à **Tchernobyl**, deux à **Smolensk**. Un réacteur de même type mais d'une puissance de 1500 MWe a été développé ; le premier, construit à **Ignalinsk**, est entré en service à pleine puissance en mai 1985. La taille du réacteur est identique, mais la puissance spécifique a été augmentée de 50 %.

Actuellement, quatre réacteurs de 1000 MWe et trois réacteurs de 1500 MWe sont en construction dont les tranches 5 et 6 du site de **Tchernobyl**. Le tableau n° 2-1 présente la liste des réacteurs RBMK.

La filière RBMK représente, donc par sa puissance installée (15500 MWe), la moitié du parc électronucléaire soviétique. La filière VVER, analogue dans ses principes à la filière des réacteurs à eau sous pression (REP) tels que ceux construits en France, s'est développée parallèlement au RBMK en Union Soviétique et assure à peu près l'autre moitié de la production électronucléaire. Cette deuxième filière comporte au moins 25 tranches en construction et a donné lieu à des exportations vers les pays de l'Est. Elle semblait donc avoir de meilleures perspectives que la filière RBMK, dont l'avenir est maintenant incertain. Il semble bien qu'on n'entreprendra pas d'autres constructions de réacteurs RBMK au delà de celles en cours.

D'autres filières de réacteurs sont développées, notamment la filière des réacteurs à neutrons rapides, mais ne représentent actuellement pas un poids important dans le parc des centrales.

2.2. LA CENTRALE NUCLEAIRE DE TCHERNOBYL

La centrale nucléaire de **Tchernobyl** est située dans la partie orientale de la **Polesie**, à la limite de la **Bielorussie** et l'**Ukraine**, au bord de la rivière **Pripyat**, affluent du **Dniepr** (voir annexe site).

La construction des deux premiers réacteurs RBMK 1000 (1 et 2) a duré de 1970 à 1977, celles des deux tranches suivantes (3 et 4) s'est achevée en 1983. Deux autres tranches (5 et 6) sont en construction depuis 1981 à 1,5 km au sud-est. Les quatre premières tranches sont construites en alignement, les salles des machines comprenant les quatre paires de turboalternateurs s'étendent sur 800 mètres. Elles sont refroidies à l'aide de l'eau d'un lac artificiel de 22 km² construit en bordure de la rivière. Les tranches 5 et 6 comportent des tours de refroidissement en parallèle avec le lac.

Une paire de tranches comporte des systèmes généraux et auxiliaires communs comme les stockages d'effluents, la production de gaz, et les diesels de secours. L'installation de production de gaz fournit l'air comprimé, l'azote, l'hydrogène, l'hélium et l'argon et comprend des réservoirs d'azote et d'hydrogène extérieurs. Les groupes de secours comprennent deux ensembles de trois générateurs diesel d'une puissance unitaire de 5,5 MW. Les bâtiments situés entre les réacteurs et la salle des machines contiennent notamment les équipements électriques et les salles de commande.

2.3. LE REACTEUR RBMK (figure 2-1 – Tableau 2-2)

Le bloc réacteur est constitué d'un empilement de graphite d'environ 12 m de diamètre et de 8 m de haut, traversé verticalement par 1681 tubes de forces contenant le combustible parcourus par une circulation d'eau ordinaire.

Le cœur contient 190 tonnes d'uranium enrichi à 2 % sous forme d'oxyde. La puissance spécifique dans le combustible est assez faible. Le taux de combustion moyen est de 20.000 MWj par tonne. Ce type de réacteur produit environ 3 kg de plutonium par tonne d'uranium brûlé.

Chaque tube de force contient deux sous-assemblages combustibles placés l'un au-dessus de l'autre et déchargés simultanément. Chaque sous-assemblage est composé de 18 crayons combustibles de 3,5 m de long et de 13,5 mm de diamètre. Ces crayons sont gainés avec un alliage de zirconium-niobium. L'épaisseur de la gaine est de 0,9 mm.

Les tubes de force (diamètre 88 mm, épaisseur 4 mm) sont en alliage zirconium-niobium à 2,5 % Nb dans la partie active du cœur et en acier austénitique dans les parties hautes et basses (figure 2-2).

Les liaisons acier-zirconium sont réalisées, d'une part par des soudures homogènes, par des jonctions zirconium-acier inoxydable préfabriquées d'autre part.

L'empilement de graphite qui constitue le modérateur contient 2488 colonnes verticales de blocs de graphite parallélépipédiques de 25 cm de côté et de différentes hauteurs (figure 2-3). Le graphite a une densité de 1,67. Ces blocs de graphite comportent également des trous verticaux pour les barres de contrôle et les systèmes d'instrumentation du cœur. Des anneaux de graphite enfilés sur les tubes de force assurent les contacts thermiques entre les blocs de graphite et les tubes de force. L'ensemble de l'empilement de graphite est contenu dans une enveloppe remplie d'un mélange d'hélium et d'azote qui permet un contrôle chimique du graphite. Toutefois, l'évacuation de l'énergie dégagée dans le graphite, soit environ 5 % de l'énergie totale, ne se fait que par conduction vers les tubes de force. Ainsi la température moyenne du graphite est d'environ 500° C et elle peut atteindre localement 760° C.

Le cœur est entouré par un réflecteur radial de 1 m d'épaisseur et de réflecteurs supérieurs et inférieurs de 0,5 m d'épaisseur. Le réflecteur radial est refroidi par 156 canaux verticaux placés en périphérie.

L'ensemble du bloc réacteur repose sur une structure mécano-soudée qui est contenue dans une cavité en béton de 21,60 m de côté et de 25,50 m de haut.

Au-dessus du réacteur, une machine permet le déchargement - chargement du combustible dans les tubes de force (figure 2-4). Elle comporte un circuit de refroidissement particulier. Après accostage de la machine sur la tête d'un canal, l'ensemble des deux assemblages du canal est retiré puis, après rotation d'un barillet, deux assemblages neufs sont descendus dans le canal et celui-ci est refermé. La machine va ensuite déposer les assemblages irradiés dans une piscine de désactivation.

Le contrôle est assuré par 211 barres absorbantes qui occupent des tubes de force analogues aux précédents répartis dans tout le réseau. Ces barres sont actionnées par des mécanismes situés au-dessus du cœur sous le plancher de protection du hall. Ces barres absorbantes sont constituées d'éléments articulés entre eux. Chaque élément est constitué d'anneaux de carbure de bore de 65 mm de diamètre et de 7,5 mm d'épaisseur contenu de façon étanche dans un tube externe de 70 mm de diamètre et de 2 mm d'épaisseur et un tube interne de 50 mm de diamètre et de 2 mm d'épaisseur, en alliage d'aluminium. Chaque barre est constituée de six éléments articulés. Elles sont refroidies par un circuit d'eau à basse température (50° C). Ces barres sont prolongées par des éléments inertes pour éviter un déplacement d'eau quand elles sont retirées. La vitesse maximale d'insertion est de 0,4 m/s.

Le refroidissement du réacteur est effectué par deux boucles évacuant chacune l'énergie produite par la moitié du cœur. Chaque boucle comprend deux ballons séparateurs et quatre pompes de recirculation (3 en fonctionnement et 1 en réserve). Le mélange d'eau et de vapeur sortant de chaque tube de force arrive par une tuyauterie dans un de ces ballons séparateurs de 30 m de long et de 2,30 m de diamètre dans lequel l'eau et la vapeur sont séparées (figure 2-5 et 2-6).

L'eau retourne par 12 tuyauteries vers les collecteurs et les pompes de recirculation qui alimentent les tubes de force par un système de collecteurs, de sous-collecteurs et de tuyauteries. Sur chaque boucle, il y a 22 sous-collecteurs de 300 mm de diamètre.

L'eau entrant dans le cœur à 270° C est réchauffée sur 2,50 m de hauteur et bout dans la partie supérieure. A la sortie du cœur, le titre est de 14,5 % à pleine puissance. La pression de sortie est de 70 bars et la température de 284° C. Le débit de chaque tube de force peut être réglé par une vanne de façon à s'adapter à la distribution de puissance.

2.4. Contrôle du réacteur

Le contrôle du niveau et de la distribution de puissance dans un cœur de grandes dimensions est un problème de sûreté complexe.

Les réacteurs de type RBMK sont caractérisés par :

- une instabilité due à des oscillations radiale et azimutale de puissance dues à l'effet du Xénon dans des cœurs de grande taille (12 m x 7 m).
- un coefficient de vide positif qui élimine en partie l'effet autostabilisant des autres contre-réactions. Une augmentation de puissance accroît le taux de vapeur (dit taux de vide) dans le canal, ce qui libère de la réactivité et accentue l'augmentation de puissance ; le contrôle de la réaction est obtenu par insertion des grappes de contrôle. L'effet global de vide (gain en réactivité dans l'hypothèse où tous les canaux se vident) est d'environ 2000 pcm (pour cent mille unité de réactivité) en partant de la pleine puissance et 2750 pcm en partant de l'état d'arrêt du réacteur.

La stabilité du cœur est fonction du coefficient global de puissance qui est la somme des coefficients de vide et de température du combustible (Effet Doppler). Pour les puissances élevées, le coefficient global de puissance est négatif alors que pour les puissances faibles en-dessous de 700 MWth, ce coefficient est positif.

D'autres paramètres influencent ces coefficients, en particulier le coefficient de vide est d'autant plus positif que les grappes de contrôle sont retirées du cœur.

En résumé, lorsque la puissance baisse ou lorsque l'on remonte les grappes, et a fortiori si l'on combine les deux actions, le cœur devient plus instable.

Un ensemble de grappes de contrôle (211) permet de moduler le niveau et la répartition de la puissance dans le cœur. Ces grappes sont, de par leur fonction, réparties en six groupes :

- les 24 grappes courtes qui doivent assurer le contrôle de la distribution de puissance axiale,
- les 24 grappes participant au contrôle automatique du réacteur, qui sont divisées en deux sous-groupes : celles utilisées pour le contrôle local de la distribution de puissance (12) et celles qui sont affectées au contrôle du niveau de puissance,
- les 139 grappes qui, en fonctionnement normal, sont manœuvrées directement par l'opérateur et permettent de moduler la distribution de puissance afin d'optimiser l'utilisation du combustible. En particulier, lors du rechargement d'un canal, les grappes manuelles adjacentes sont insérées dans le cœur afin de réduire localement la puissance pendant que le réacteur continue à fonctionner,
- les 24 grappes assurant la protection du cœur.

En fonction des temps de réponse et de la précision des mesures, les systèmes de contrôle de la puissance peuvent être séparés en trois niveaux :

- tout d'abord un ensemble de systèmes (CPS) à réponse rapide permettant le contrôle du niveau global de puissance ainsi que la distribution macroscopique (harmonique de rang faible) que l'on peut appeler "Contrôle et protection" par analogie avec les tranches françaises.
- un deuxième niveau, appelé surveillance (SPMPD) qui guide l'opérateur pour les mouvements de grappes de contrôle destinés au contrôle des oscillations dues au Xénon (harmonique de rang fort). Le temps de réponse de ce deuxième niveau est de l'ordre de la minute.
- enfin un troisième niveau (CMS) qui permet d'optimiser la gestion du combustible et de programmer les chargements.

2.4.1. Les systèmes de "contrôle et protection" (CPS)

Ils utilisent des chambres d'ionisation situées dans le réflecteur (4) et à l'extérieur du cœur (24) ainsi que 24 chambres à fission placées dans le tube d'instrumentation de certains assemblages combustibles. Ces détecteurs ont une réponse rapide, de l'ordre de la milliseconde.

Pour ce qui concerne les systèmes de contrôle, on distingue le système de régulation global qui ajuste le niveau de puissance sur une valeur de consigne et le système de contrôle local qui commande chaque grappe individuellement :

- le système de contrôle global comprend trois ensembles identiques de quatre chambres d'ionisation placées dans le réflecteur qui permettent de manœuvrer respectivement trois ensembles de quatre grappes. Ce système de contrôle du niveau de puissance est utilisé en permanence à basse puissance (0,5-10 %) et seulement en cas de défaillance du système de contrôle local lorsque la tranche fonctionne au-dessus de 10 %.
- le système de contrôle local est mis en service lorsque le système précédent a détecté un niveau de flux suffisant. Il a pour objectif de contrôler indépendamment la puissance générée dans les douze régions du cœur. Pour cela, chacune des douze grappes affectées à ce

système est surveillée par deux chambres à fission situées à proximité. La vitesse et la durée d'un retrait continu sont limitées afin de réduire les conséquences d'un retrait incontrôlé des grappes.

- le système de protection permet de commander toutes les grappes, excepté les grappes courtes. Cependant 24 grappes jouent un rôle similaire aux grappes d'arrêt sur les réacteurs à eau sous pression ; en effet, les autres grappes ne peuvent pas être extraites si ces 24 grappes d'arrêt ne sont pas en position haute.

Les concepteurs ont distingué cinq niveaux d'urgence :

- le niveau 5 qui doit conduire à l'arrêt immédiat du réacteur, et qui est déclenché sur différents signaux, en particulier une surpuissance supérieure à 10 % ou une période inférieure à 10 secondes. Dans ce cas, le système ordonne l'insertion de toutes les grappes à 0,4m/s,
- le niveau 5 * qui demande une insertion rapide des 12 grappes de régulation et ceci jusqu'à ce que la cause ait disparu. Ce signal est déclenché en cas de dépassement du niveau de puissance de consigne,
- les niveaux 1, 2 et 3 qui sont déclenchés en fonction de signaux non nucléaires ; ils conduisent à une réduction rapide de puissance à 2 % par seconde jusqu'à respectivement 60, 50 et 20 % de puissance.

Compte tenu des temps de réaction des réacteurs RBMK, il est nécessaire de pouvoir disposer d'une efficacité des grappes d'environ 500 pcm/s en cas d'urgence. Cette "réserve d'antiréactivité" est obtenue en maintenant un grand nombre de barres (minimum 30) au milieu du cœur. Il faut remarquer que, compte tenu de la hauteur du cœur, les grappes totalement extraites ont une efficacité très faible pendant au moins deux à trois secondes. Les spécifications techniques imposaient de maintenir au moins 30 grappes dans la partie active du cœur.

Ces systèmes ont été conçus pour limiter le nombre d'arrêts d'urgence et les baisses de puissance ne sont effectuées que si le signal est confirmé par plusieurs détecteurs.

2.4.2. Le système de surveillance de la distribution de puissance

Il a pour mission de donner des informations à l'opérateur pour l'ajustement de la position des grappes de contrôle (139) destiné à compenser les effets d'épuisement du combustible et les oscillations de puissance dues au Xénon (harmonique de rang fort).

Le SPMPDR qui est composé de 130 collectrons rhodium-argent (de 4 m de long placés verticalement dans le tube d'instrumentation de certains assemblages) a pour mission de surveiller la distribution radiale.

Le SPMPDH qui est composé de douze grappes de 7 collectrons (spirale de 2,60 m de long placée dans le tube d'instrumentation) permet la surveillance de la distribution axiale. Ce type de détecteur au rhodium ou à l'argent a une réponse lente (temps de réponse à 63 % du signal, respectivement 68 secondes et 51 secondes) et est utilisé en général pour la gestion du combustible et les instabilités dues au Xénon.

Dans les RBMK ces systèmes sont, semble-t-il, aussi utilisés pour se protéger contre les retraits incontrôlés de grappes. Les documents soviétiques indiquent qu'il est envisagé d'utiliser des collectrons à réponse rapide (Hafnium) afin "de posséder une protection locale automatique contre les retraits incontrôlés de grappes".

Chacun de ces collectrons est recalibré périodiquement à l'aide de chambres à fission mobiles scrutant le même canal ou le canal voisin.

L'électronique associée à ces détecteurs permet, après normalisation des signaux, de connaître les écarts entre les distributions de puissance mesurées et celles de référence, aussi bien radiale qu'axiale. L'opérateur ajuste alors manuellement la position des grappes de contrôle pour réduire ces écarts.

2.4.3. Le calculateur d'aide au pilotage (CMS)

Il utilise les mêmes capteurs que les systèmes décrits précédemment mais permet, à partir de résultats de code de calcul :

- d'optimiser la gestion des assemblages combustibles en calculant les distributions de puissance de référence,
- de conseiller l'opérateur pour les mouvements manuels des grappes de contrôle,
- de mettre à jour les constantes de corrections des mesures de flux,
- de déterminer le réglage du débit de réfrigérant dans chaque canal.

2.5. Les systèmes de protection et de sauvegarde

2.5.1. Dimensionnement des systèmes de protection du RBMK

Comme il vient d'être dit, la logique de protection est organisée selon cinq niveaux d'urgence en fonction de la situation :

- La protection de niveau 5 qui provoque l'arrêt total et rapide du réacteur est mise en œuvre par l'un des signaux suivants :
 - augmentation de puissance de 10 % PN,
 - baisse ou élévation importante de niveau dans l'un des séparateurs,
 - baisse importante du débit d'eau alimentaire,
 - élévation importante de pression dans l'un des séparateurs,
 - élévation de pression dans les cavités des séparateurs ou des tubulures à l'entrée du cœur,
 - élévation de pression dans la cavité du réacteur,
 - baisse de niveau dans la bache de refroidissement des barres de contrôle et de protection,
 - baisse de débit dans les canaux de refroidissement des barres de contrôle et de protection,
 - déclenchement des deux turbo-alternateurs,
 - déclenchement de 3 des 4 pompes principales de circulation sur l'une des boucles,
 - perte des alimentations électriques auxiliaires,
 - non exécution des ordres de protection de niveau 1 - 2 - 3,
 - commande manuelle.
- La protection de niveau 5 * qui agit avec la même cinétique que la protection de niveau 5 jusqu'à ce que le signal ayant provoqué la demande d'arrêt ait disparu, est initiée par un dépassement de puissance par rapport à la consigne.

- Les protections de niveaux 1,2 et 3 provoquent des baisses de charge depuis la puissance du réacteur jusqu'à respectivement 60, 50 et 20 % de PN à raison de 2 % PN/s.
- La protection de niveau 3 est mise en œuvre par l'ouverture du contournement de la turbine sur les deux turbo-alternateurs.
- La protection de niveau 2 intervient lors des situations de :
 - déclenchement de l'un des 2 turbo-alternateurs,
 - ouverture du contournement de la turbine sur l'un des 2 turbo-alternateurs.
- La protection de niveau 1 est conçue pour les situations suivantes :
 - déclenchement d'une des 3 pompes sur une boucle,
 - baisse du débit de circulation,
 - baisse du débit d'eau alimentaire,
 - baisse du niveau dans les séparateurs.

L'élaboration de ces signaux de protection se fait en logique 2/4. De plus, chacun de ces signaux peut être individuellement inhibé lors des essais périodiques.

2.5.2. Dimensionnement des systèmes de sauvegarde

1) Injection de sécurité

Ce système est conçu pour assurer le renoyage du cœur et pour évacuer la puissance résiduelle en cas de brèche sur le circuit primaire.

Les accidents étudiés sont les suivants :

- rupture d'un grosse tuyauterie du circuit primaire,
- rupture d'une ligne de vapeur,
- rupture d'une ligne d'eau alimentaire.

De plus, ce système peut être utilisé dans les cas où le système normal d'alimentation en eau est indisponible.

L'injection de sécurité entre automatiquement en action sur l'un des signaux suivants :

- augmentation de pression dans un des compartiments contenant les pompes de circulation,
- coïncidence des signaux suivants sur une même boucle :
 - baisse de niveau dans un séparateur,
 - diminution de la différence de pression entre le séparateur et le refoulement des pompes de circulation.

Ces signaux permettent d'identifier la boucle rompue.

Les capacités fonctionnelles du système sont définies à partir des études d'accidents qui permettent de fixer les débits minimaux que doit injecter le système d'injection afin d'éviter tout dommage important sur les éléments combustibles.

L'accident de dimensionnement est la rupture d'un collecteur de 900 mm cumulé avec la perte des alimentations électriques et la prise en compte du critère de défaillance unique.

Les réacteurs RBMK étant composés de deux boucles relativement indépendantes, le système d'injection de sécurité comprend deux ensembles, un par boucle.

En situation accidentelle le principe de fonctionnement du système est le suivant (figure 2-7).

a) Refroidissement de la boucle intacte

La boucle intacte est alimentée par un ensemble de 3 pompes (P2) ayant chacune 50 % de la capacité requise et aspirant dans une bache d'eau déminéralisée. Par un jeu de vannes, les automatismes orientent le débit vers la boucle reconnue intacte.

b) Refroidissement de la boucle rompue

Pour assurer ses différentes fonctions, le système d'injection de sécurité est organisé en 3 sous-systèmes :

* **2 sous-systèmes** sont identiques et comportent :

- **3 accumulateurs (A)** par boucle (2 x 3) constituant la partie à **action rapide**.

Chaque accumulateur A contient 13 m³ d'eau et 12 m³ d'azote à 100 bars. Les 3 accumulateurs relatifs à un sous-système et à une boucle assurent 50 % de la capacité de renouveau pendant au moins 100 s et débitent en moins de 3,5 s par l'intermédiaire de vannes à action rapide dont les actionneurs sont secourus par des batteries d'accumulateurs.

- **2 pompes (P1)** en parallèle dont le débit est orienté par un jeu de vannes vers la boucle rompue et qui constituent la partie à **action lente** du sous-système devant assurer le refroidissement à moyen et long terme.

Chaque groupe de 2 pompes P1 assure un débit de l'ordre de 500 t/h soit 50 % de la capacité requise pour extraire 50 % de la puissance résiduelle. Elles aspirent dans la piscine de suppression de pression. L'eau est refroidie en traversant un échangeur à eau brute.

L'eau injectée dans la branche rompue, retournant à la piscine de suppression de pression, ces pompes fonctionnent en recirculation sur la piscine.

* **le troisième sous-système** comporte :

- **une pompe (P3)** aspirant dans une bache d'eau déminéralisée et constituant la partie à **action rapide**.

La pompe est alimentée par le groupe turbo-alternateur découplé du réseau et fonctionnant sur son inertie. Rappelons que ce mode d'alimentation faisait l'objet de l'essai en cours lors de l'accident.

- **un ensemble pompes-échangeur** identique à ceux des sous-systèmes précédents, constitue la partie à **action lente**.

2) Protection contre les surpressions

Le système de protection est conçu pour limiter la pression du circuit à 115 % de la pression nominale en tenant compte du critère de défaillance unique.

Le système assure la décharge de l'excès de vapeur dans la piscine de suppression de pression ou celle-ci est condensée.

Le schéma du système est présenté figure 2-8.

Ce système comporte 2 soupapes principales de sûreté à vannes pilotes, à commande électromagnétique sur chacune des 4 lignes de vapeur. Chaque soupape de sûreté a une capacité de 725 t/h (la capacité des 8 soupapes correspond au débit nominal). La vapeur est déchargée en dessous du niveau d'eau de la piscine de surpression de pression par l'intermédiaire de 1200 injecteurs de 40 mm de diamètre.

Des éjecteurs air-vapeur sont utilisés pour éviter la formation de vide dans les lignes et la condensation de vapeur provenant de petites fuites aux soupapes.

Le tarage des soupapes est échelonné entre 76 et 81 bars et il est possible de forcer leur ouverture depuis la salle de commande.

Chaque composant du système est testé individuellement sur banc puis l'ensemble fait l'objet d'essais lors du démarrage.

2.6. LE CONFINEMENT

2.6.1 LA CAVITE CŒUR DU REACTEUR

2.6.1.1. Généralités

Dans la cavité cœur, les canaux verticaux contenant le combustible sont insérés dans des colonnes de graphite isolées par des plaques de protection placées au sommet et à la base de la cavité.

Un dispositif de surveillance permanente de l'étanchéité des gaines du combustible est installé. Il consiste en une mesure en ligne de l'activité des produits de fission volatils à courte période dans l'eau de circulation de chaque canal.

Il existe également un ensemble de systèmes conçus pour limiter une surpression par des dispositifs permettant d'orienter la vapeur vers une piscine à suppression de pression où la vapeur se condense. Ces systèmes sont dimensionnés pour éviter une surpression consécutive à la rupture d'un canal

2.6.1.2 Description et protection biologique (rappel)

Le cœur du réacteur (figure 2-9 (1)) est constitué d'un cylindre vertical d'environ 12 m de diamètre et d'une hauteur de 7 m. Il est entouré latéralement et verticalement par des réflecteurs en graphite respectivement de 1 et 0,5 m d'épaisseur.

Le graphite est confiné dans la cavité cœur latéralement par un cylindre d'isolement (2) en acier de 16 mm d'épaisseur (14,5 m de diamètre externe et 9,75 m de haut) et par des structures métalliques à la base et au sommet (3 et 4).

Environ 5 % de la puissance du réacteur sont relâchées dans le graphite.

Pour prévenir l'oxydation du graphite et pour favoriser le transfert de chaleur du graphite vers les canaux une circulation d'un mélange hélium-azote (85-90 % He/15-10 % N₂) est assurée dans le bloc de graphite. Ce mélange sert également à la surveillance de l'étanchéité des canaux par une mesure d'humidité et de température des gaz.

Pour empêcher d'avoir des fuites d'hélium venant de la cavité, l'espace libre autour du cylindre d'isolement (2) et dans les cavités des structures métalliques (3 et 4) est pressurisé à l'azote à une surpression de 5 à 10 mbars.

La protection biologique latérale (5) est formée d'un réservoir cylindrique en acier de 30 mm d'épaisseur (19 m de diamètre externe et 16,6 m de diamètre interne). L'intérieur du réservoir est divisé en 16 compartiments verticaux étanches contenant de l'eau.

La structure métallique supérieure (4) est composée d'un cylindre en acier de 40 mm d'épaisseur, d'un diamètre de 17 m et de 3 m de haut. Le volume entre les canaux et les ailettes soudées aux plaques supérieure et inférieure du cylindre est occupé par de la serpentine.

La structure de protection biologique à la base (3) est constituée d'un cylindre de 14,5 m de diamètre et de 2 m de haut, analogue à la structure supérieure.

On notera qu'il existe entre le bloc de graphite et les structures métalliques supérieure et inférieure, des plaques d'acier (6) d'épaisseurs respectivement égales à 250 mm et 100 mm, ceci afin de protéger les structures.

La dalle supérieure (7) couvrant l'ensemble est formée de blocs d'une épaisseur de 890 mm et constitués d'un mélange fer-baryum-serpentine.

Au-delà du réservoir cylindrique rempli d'eau (5), on trouve du sable (8) et le mur en béton (9) englobant l'ensemble de la cavité cœur.

La protection biologique est conçue pour que le débit de dose dans le hall de circulation de l'installation soit inférieur à $2,8 \cdot 10^{-2}$ mSv/h (2,8 m rem/h).

2.6.2. SYSTEME DES ZONES ETANCHES (CONFINEMENT MODULAIRE)

2.6.2.1 Principe

Succédant aux deux premières barrières (gainés et tubes de force) l'ultime moyen de confinement prévu sur ce type de réacteur est de conception modulaire (plusieurs niveaux de confinement).

Le principe de ce confinement consiste à séparer les modules ou zones abritant soit le cœur, soit les systèmes de refroidissement et à les dimensionner afin de garantir un confinement spécifique à chacun d'entre eux en fonction du risque interne, notamment vis-à-vis de la pression engendrée en cas de brèche d'un système ou d'une tuyauterie.

Cette pratique se distingue de celle utilisée par la plupart des pays occidentaux qui consiste à concevoir un confinement global couvrant l'essentiel des parties sensibles du réacteur.

2.6.2.2 description (figure 2-10)

Le système de confinement est donc basé sur des zones, ou modules, étanches qui sont :

- les zones des tuyauteries et pompes principales,
- la zone des tuyauteries alimentant les tubes de force,
- la zone tampon de décharge de la vapeur,
- la piscine de suppression de pression à 2 étages (condensation de la vapeur).

Les modules sont reliés entre eux par :

- a) des clapets installés entre le module abritant les tuyauteries alimentant les tubes de force et la zone tampon de décharge de la vapeur, elle-même en communication avec la piscine de suppression de pression,

- b) des vannes de décharge situées à l'interface des zones des pompes principales de circulation et du ciel de la piscine de suppression de pression,
- c) des clapets installés entre le module abritant les tuyauteries et les pompes principales et la zone tampon de décharge de la vapeur.

Les modules des pompes principales et la zone tampon de décharge de la vapeur sont en liaison directe pour barbotage, via des canaux de sortie de vapeur, avec l'eau de la piscine de suppression de pression.

Durant l'exploitation normale de l'installation les divers modules de confinement susmentionnés et la piscine de suppression de pression sont en attente, donc disponibles.

Par contre, en situation accidentelle du type brèche primaire, le système de confinement modulaire fonctionne de la façon suivante :

1) Brèche dans l'une des zones des tuyauteries et pompes principales

La vapeur libérée va provoquer une montée en pression dans la zone endommagée entraînant l'ouverture du clapet et sa mise en liaison avec la zone tampon de décharge de la vapeur (clapet s'ouvrant pour un ΔP de 20 mbars).

Quand la pression dans l'une des deux zones (pompes principales, tampon de décharge de la vapeur) atteint la valeur correspondant à la hauteur de colonne d'eau présente dans les canaux de sortie de vapeur plongeant dans les deux étages de la piscine, le contact s'établit entre l'atmosphère du/des modules et la piscine.

Après barbotage, quand la pression relative dans le ciel de la piscine de suppression de pression est supérieure à 50 mbars, la vanne de décharge connecte le volume libre de la piscine avec le module étanche des tuyauteries principales non affectées (symétrique du module où a eu lieu la brèche). Ceci permet de réduire la pression dans la partie endommagée de l'installation. Dans cette situation accidentelle, la zone abritant les tuyauteries alimentant les tubes de force n'est pas concernée.

2) Brèche dans la zone des tuyauteries alimentant les tubes de force

Si cette zone est le siège de l'accident, les clapets situés entre celle-ci et la zone tampon de décharge de la vapeur s'ouvrent pour un ΔP de 20 mbars, évacuant le mélange air-vapeur vers la piscine de suppression de pression par les canaux centraux de sortie de vapeur. Ensuite, lorsque la surpression dans le ciel de la piscine de suppression de pression atteint 50 mbars par rapport aux zones des tuyauteries et des pompes principales, initialement non concernées par l'accident, les vannes de décharge s'ouvrent afin d'offrir un volume supplémentaire pour dépressuriser.

L'ensemble des modules de confinement possède une peau d'étanchéité en acier de 4 mm d'épaisseur. Le calcul de la pression de dimensionnement des modules (figure 2-10) prend en compte une rupture circonférentielle d'une tuyauterie principale de 900 mm et d'une tuyauterie d'eau alimentaire de 300 mm.

2.6.3. ISOLEMENT DU CONFINEMENT MODULAIRE

Des vannes d'isolement permettent d'isoler toutes les tuyauteries à l'interface des zones étanches et des autres locaux. Le système obéit aux principes suivants :

- les tuyauteries non reliées directement au circuit primaire ou à l'atmosphère des modules étanches sont équipées d'un dispositif d'isolement placé à l'extérieur de la zone étanche,
- les positions des vannes d'isolement sont retransmises en salle de commande et l'opérateur dispose des moyens de commande, si nécessaire, de ces vannes,
- les alimentations électriques sont toutes secourues.

2.6.4. PISCINE DE SUPPRESSION DE PRESSION

Cette piscine est constituée d'une capacité en béton armé à 2 étages équipée d'une peau d'étanchéité interne. L'épaisseur de la couche d'eau dans chaque étage est de 1,2 m, le volume total d'eau pour les 2 étages est de 3 200 m³ et le volume libre total est de 3700 m³.

Le niveau ainsi que les caractéristiques physico-chimiques de l'eau des deux étages de la piscine font l'objet d'une surveillance permanente et, si nécessaire, d'un traitement spécifique.

A la piscine de suppression de pression décrite au paragraphe 2-6-2, sont associés un système de refroidissement et deux systèmes de maintien de la pression dans le circuit primaire et dans la cavité cœur du réacteur dans les limites admissibles.

- Le système de refroidissement comprend deux circuits distincts (figure 2-10) :
 - un circuit de refroidissement comprenant des pompes et des échangeurs alimentant un système de circulation d'air forcé – chaque local des pompes principales contient 16 (4 x 4) éjecteurs d'air de 2500 m³/h chacun (figure 2-11) – et un système d'aspersion de l'espace libre de la piscine. En complément de sa fonction de refroidissement, ce circuit permet le traitement des substances radio-actives présentes dans l'atmosphère ou/et dans l'eau. Notons que ce circuit de refroidissement est en fonctionnement permanent pour toutes les situations de fonctionnement de l'installation.
 - des condenseurs situés dans l'espace tampon de décharge de la vapeur et ne fonctionnant qu'en situation accidentelle.
- Le système de protection du circuit primaire vis-à-vis d'une montée en pression excessive (> 15 % de la pression normale) permet, via 8 vannes de décharge, d'extraire de la vapeur et de la condenser dans la piscine de suppression de pression.

La première vanne de décharge (725 t/h) s'ouvre automatiquement dès que la pression atteint 76 bars. La capacité maximale de décharge est de 5800 t/h. Après avoir transité par des éjecteurs d'air, la vapeur est introduite dans l'eau par des buses immergées (environ 1200) d'un diamètre de 40 mm.

- Le système de protection de la pression dans la cavité cœur assure une pression absolue inférieure à 1,8 bar dans le cas d'une rupture circonférentielle d'un tube de force. La cavité cœur est constamment reliée au compartiment de décharge "vapeur et gaz" de la piscine de suppression de pression par 2 tubes d'un diamètre de 600 mm alimentés respectivement par 4 tubes d'un diamètre de 300 mm venant du sommet de la cavité cœur et 4 autres tubes de sa base (voir figure 2-12).

Chacun des 2 tubes est immergé, à des niveaux distincts du compartiment, sous 2 m d'eau assurant l'isolement de la cavité cœur vis-à-vis de l'atmosphère.

Le dispositif (élévation des tuyauteries, clapets) et les quantités d'eau présentes dans les deux niveaux du compartiment, lui-même isolé du reste de la piscine, permettent de faire en sorte que le mélange "air-vapeur" du compartiment ne parvienne pas jusque dans la cavité cœur via les tubes, même en cas d'un accident de dimensionnement.

Dès que la pression absolue atteint 1,2 bar dans la cavité cœur, le mélange "vapeur-gaz" est évacué vers le compartiment. Si la pression atteint 1,1 bar dans le compartiment, des clapets s'ouvrent sur la zone tampon de décharge de la vapeur, relâchant alors le mélange "vapeur-gaz" dans le reste de la piscine de suppression de pression via les canaux centraux de sortie de vapeur.

Le gaz est ensuite déchargé dans l'atmosphère par l'intermédiaire du système de traitement de l'hydrogène.

2.6.5. SYSTEME DE TRAITEMENT DE L'HYDROGENE

Ce système permet de créer une dépression dans les modules étanches, d'y mesurer la concentration en hydrogène et de maintenir cette concentration en-deçà de la limite de 0,2 % (en

volume) fixée à la conception, bien que la limite d'inflammabilité de l'hydrogène dans l'air soit égale à 4 %. Pour cela, les calculs ont montré qu'il était nécessaire, dans la situation accidentelle la plus défavorable, d'extraire 800 m³/h d'air des zones affectées.

Le système de traitement de l'hydrogène est composé d'un réchauffeur, d'un contacteur, d'un condenseur, d'un séparateur et d'un ventilateur doublé par un ventilateur de secours. De plus, le système répond au principe de redondance triple (3 x 100 %), chaque sous-système étant isolé géographiquement.

En situation accidentelle, le système est déconnecté et réactivé 2 ou 3 heures après l'accident. L'air ainsi traité est réinjecté dans les locaux après filtration.

2.6.6. SYSTEME DE RADIOPROTECTION

La surveillance radiologique résulte de la combinaison des fonctions principales suivantes :

- la surveillance du procédé permettant son optimisation et le contrôle de l'efficacité des barrières et du confinement,
- les mesures dosimétriques visant à déterminer le niveau des doses d'irradiation interne et externe reçues par les travailleurs de la centrale et la population.

Pour ce faire, on dispose de mesures sur site et de mesures hors site dans un rayon de 35 km autour de la centrale.

L'instrumentation comporte trois types d'appareillage :

- les instruments et équipements de laboratoire,
- les appareillages mobiles et les dosimètres individuels,
- les unités combinées qui incluent les équipements de détection, le traitement de l'information, les appareils de mesure de contamination de surface et de contamination du personnel.

On notera que la gamme de mesure de l'instrumentation, utile en situation post-accidentelle, s'étend de 10⁻⁵ à 10³ R/h.

2.6.7 LES REJETS EN FONCTIONNEMENT NORMAL

Comme pour tous les réacteurs à eau bouillante c'est-à-dire à cycle de vapeur direct, la source potentielle principale de rejet gazeux à la cheminée provient, pendant le fonctionnement normal de l'installation, de l'entraînement direct des produits radioactifs gazeux libérés par les défauts d'étanchéité des gaines (1^{ère} barrière). Pour réduire ce type de rejet les dispositions suivantes sont prévues :

- contrôle permanent de l'étanchéité des éléments de combustible et, en cas de besoin, possibilité de déchargement de ceux-ci pendant le fonctionnement du réacteur,
- réduction, par décroissance, des produits radioactifs gazeux libérés en interposant entre l'extraction du condenseur et le point de rejet un système à retard par charbon actif.

En ce qui concerne les tranches de **Tchernobyl**, les informations disponibles montrent que, malgré ces dispositions, les rejets de routine des gaz radioactifs étaient encore de 3000 curies/jour. Ces rejets semblent importants : ils correspondent approximativement aux premières évaluations de rejets des réacteurs à eau bouillante en projet ou en exploitation dans le monde occidental dans les années 1960-1970. Depuis lors, pour ces derniers, la mise en place d'un système retardateur plus élaboré basé sur l'utilisation de charbon actif refroidi à - 18° centigrades (figure 2-13) a rendu la situation beaucoup plus satisfaisante et a permis de ramener le rejet radioactif provenant de l'extraction au condenseur à environ 10 curies par jours.

Dans ces conditions, en ce qui concerne les réacteurs de **Tchernobyl**, le rejet annoncé ne s'explique que par l'absence de refroidissement des charbons de la ligne retardatrice.

Il est évident que ce point particulier concernant les rejets radioactifs gazeux n'a pas d'incidence directe sur l'accident. Il renseigne toutefois sur les niveaux des rejets autorisés.

2.6.8 REJETS GAZEUX EN CAS D'ACCIDENT

Compte tenu de la conception "modulaire" du confinement du réacteur de **Tchernobyl**, les possibilités de transfert de substances radioactives dans l'environnement, notamment en cas d'accident particulièrement grave, sont sans doute plus nombreuses que sur un réacteur BWR, et que sur un réacteur à eau pressurisée du type de ceux installés en France.

Par ailleurs, il semble que le point faible dans la conception du confinement, notamment pour les situations accidentelles non retenues pour le dimensionnement, concerne la perte d'étanchéité d'au moins l'un des modules, auquel cas la radioactivité libérée gagne directement le milieu naturel via le bâtiment du réacteur.

Dans les conditions de l'accident, après dégradation complète du confinement, le transfert des produits radioactifs vers le milieu naturel s'est effectué via le bâtiment du réacteur, sérieusement détruit, avec rétention de certaines catégories de substances radioactives dans ou sur les structures internes.

FILIÈRE R.B.M.K.

REACTEURS EN FONCTIONNEMENT EN UNION SOVIETIQUE

Nom des centrales	Puissance Brute/Nette en MWe	Divergence mois-an	Couplage au réseau mois-an
AES-1 OBNINSK	6/ 5	05.1954	27.06.1954
BELOYARSK-2	200/ 185	11.1967	29.12.1967
CHERNOBYL-1	1000/ 950	08.1977	29.09.1977
CHERNOBYL-2	1000/ 950	11.1978	22.12.1978
CHERNOBYL-3	1000/ 950	06.1981	12.1981
CHERNOBYL-4	1000/ 950	12.1983	21.12.1983
DRUKSHAI IGNALINA-1	1500/1450	10.1983	31.12.1983
KURSK-1	1000/ 950	09.1976	20.12.1976
KURSK-2	1000/ 950	12.1978	26.01.1979
KURSK-3	1000/ 950	08.1983	19.10.1983
KURSK-4	1000/ 950	11.1985	07.12.1985
LENINGRAD-1	1000/ 950	09.1973	21.12.1973
LENINGRAD-2	1000/ 950	05.1975	07.1975
LENINGRAD-3	1000/ 950	09.1979	07.12.1979
LENINGRAD-4	1000/ 950	12.1980	09.02.1981
SMOLENSK-1	1000/ 950	12.1982	12.1982
SMOLENSK-2	1000/ 950	04.1985	05.1985

REACTEURS EN CONSTRUCTION EN UNION SOVIETIQUE

Nom des centrales	Puissance en MWe Brute/Nette	Début de construction
CHERNOBYL-5	1000/ 950	1981
DRUKSHAI-IGNALINA-2	1500/1450	1978
KOSTROMA-1 (JAROSLAV)	1500/1450	1981
SMOLENSK-3	1000/ 950	1981
CHERNOBYL-6	1000/ 950	1982
KOSTROMA-2 (JAROSLAV)	1500/1450	1983
SMOLENSK-4	1000/ 950	1982

TABLEAU 2-1

CARACTERISTIQUES GENERALES

* PUISSANCE THERMIQUE	3200 MW
* MASSE D'U (sous forme d'UO ₂)	190 t
* TUBE DE FORCE	
– NOMBRE de CANAUX	1681
– HAUTEUR de CANAL	7 m
* ELEMENT COMBUSTIBLE	
GAINE en ZIRCONIUM NIOBIUM	
– NOMBRE de CRAYONS	18
* NOMBRE DE BOUCLES DE REFROIDISSEMENT	2
* NOMBRE DE POMPES DE CIRCULATION/BOUCLE	4
* INSTALLATION DE PRODUCTION D'ENERGIE	
– TURBINES	2
– POMPES d'EXTRACTION	4
– POMPES ALIMENTATION en EAU du CIRCUIT PRIMAIRE	4 + 1

CARACTERISTIQUES THERMODYNAMIQUES

* DEBIT	
– DEBIT CŒUR	11500 Kg/s
– REPARTITION du DEBIT en TUBES de FORCE	1681
* CALOPORTEUR	
– ENTREE CANAL 82 bars	270° C
– BALLON VAPEUR 70 bars	285° C
– TITRE de SORTIE	14.5 %
* GRAPHITE	
REFROIDI par CONDUCTION vers les TUBES de FORCE	
– TEMPERATURE MOYENNE	500° C
– TEMPERATURE MAXIMUM	760° C

TABLEAU 2.2

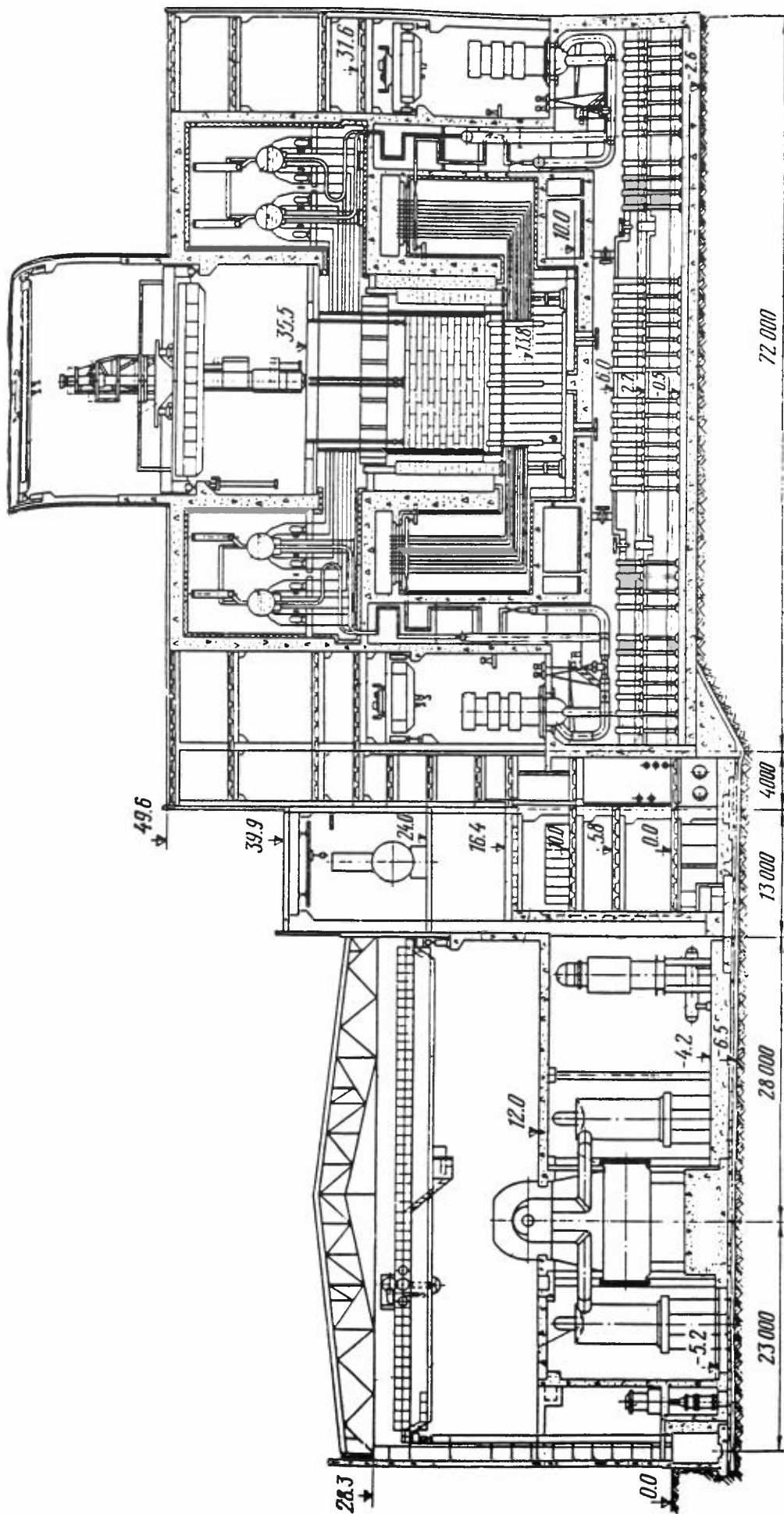


FIGURE 2-1. – COUPE DU BATIMENT PRINCIPAL

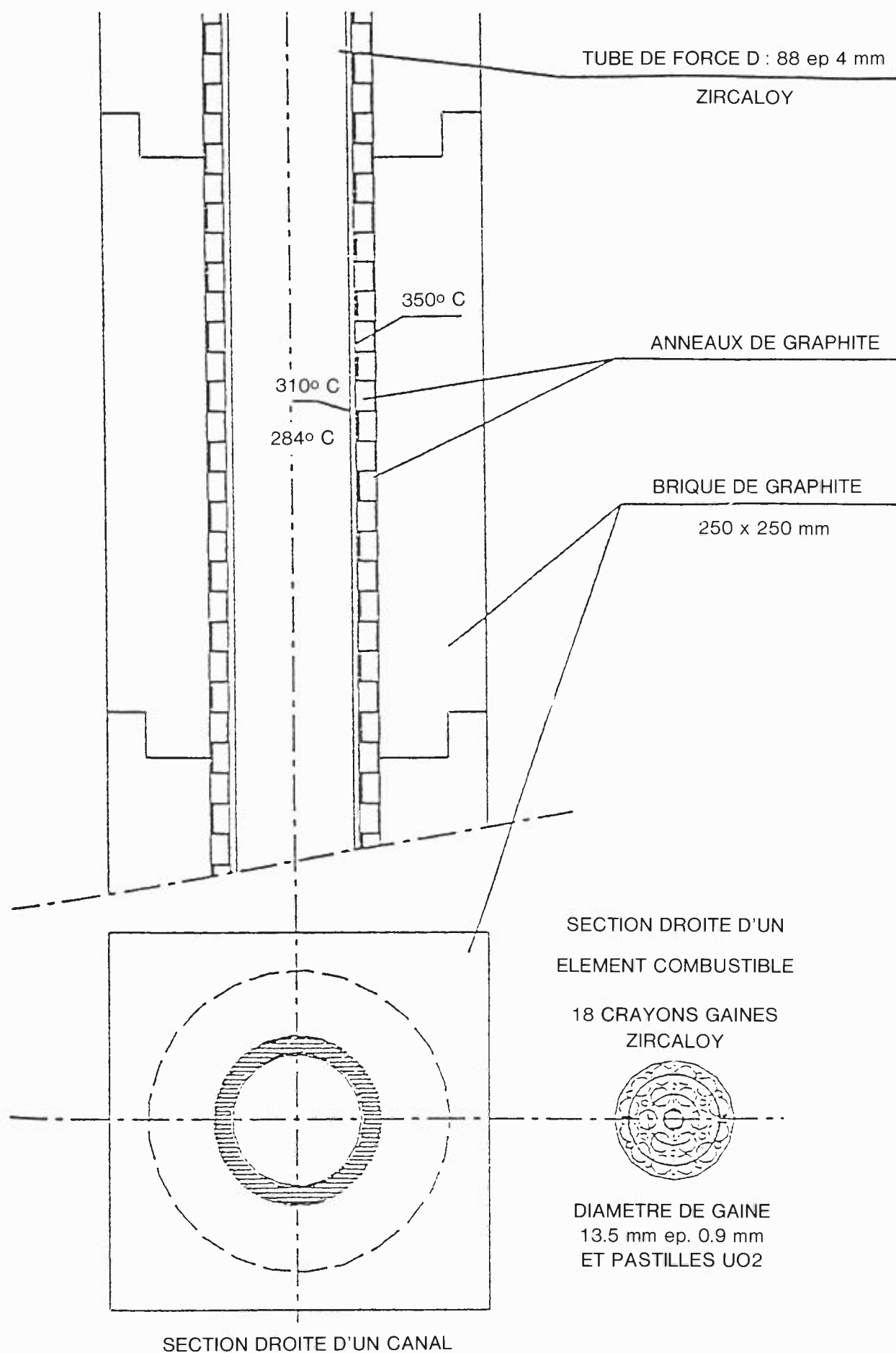


FIGURE 2.2

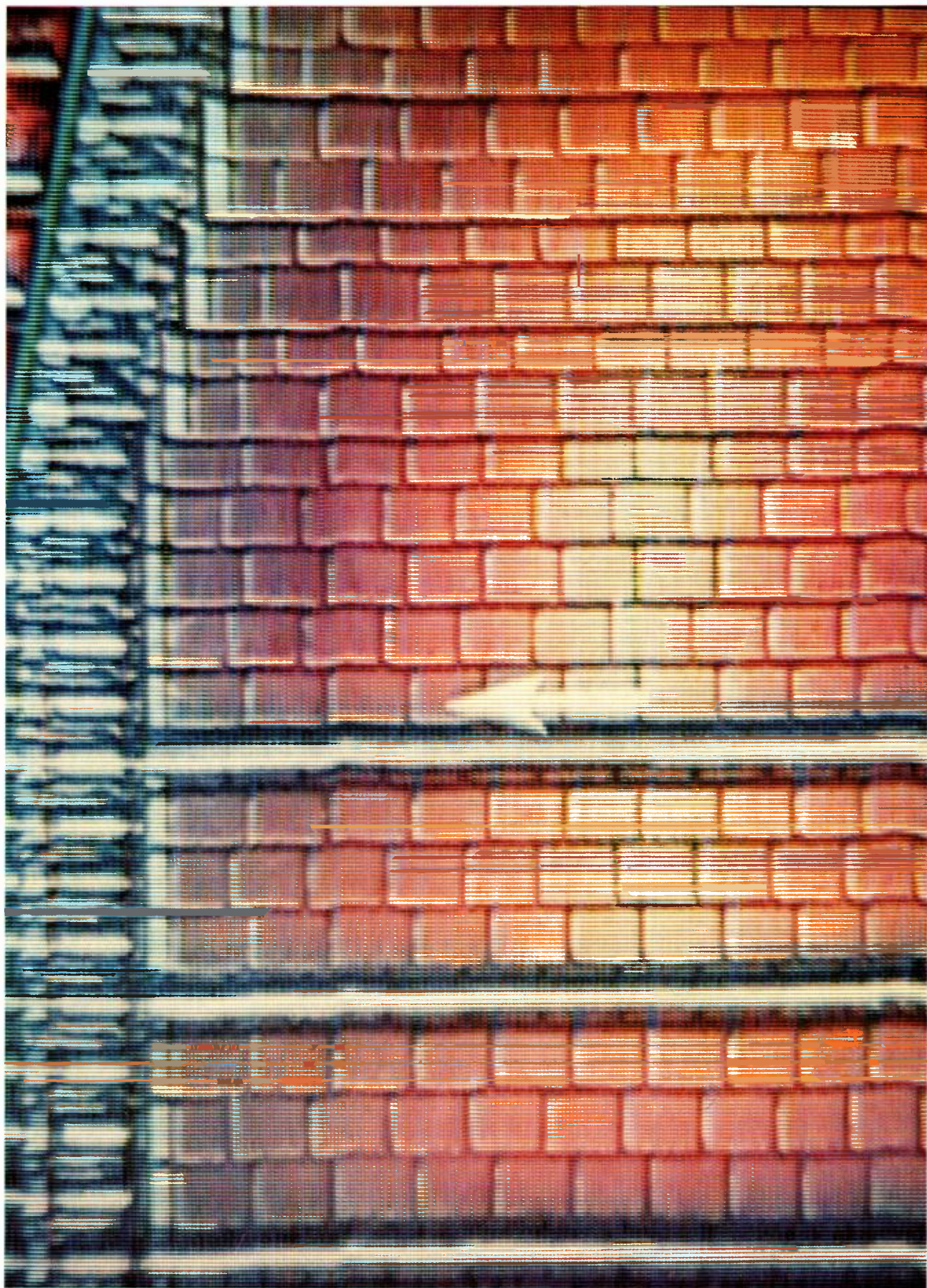


FIGURE 2-3 – BLOCS DE GRAPHITE

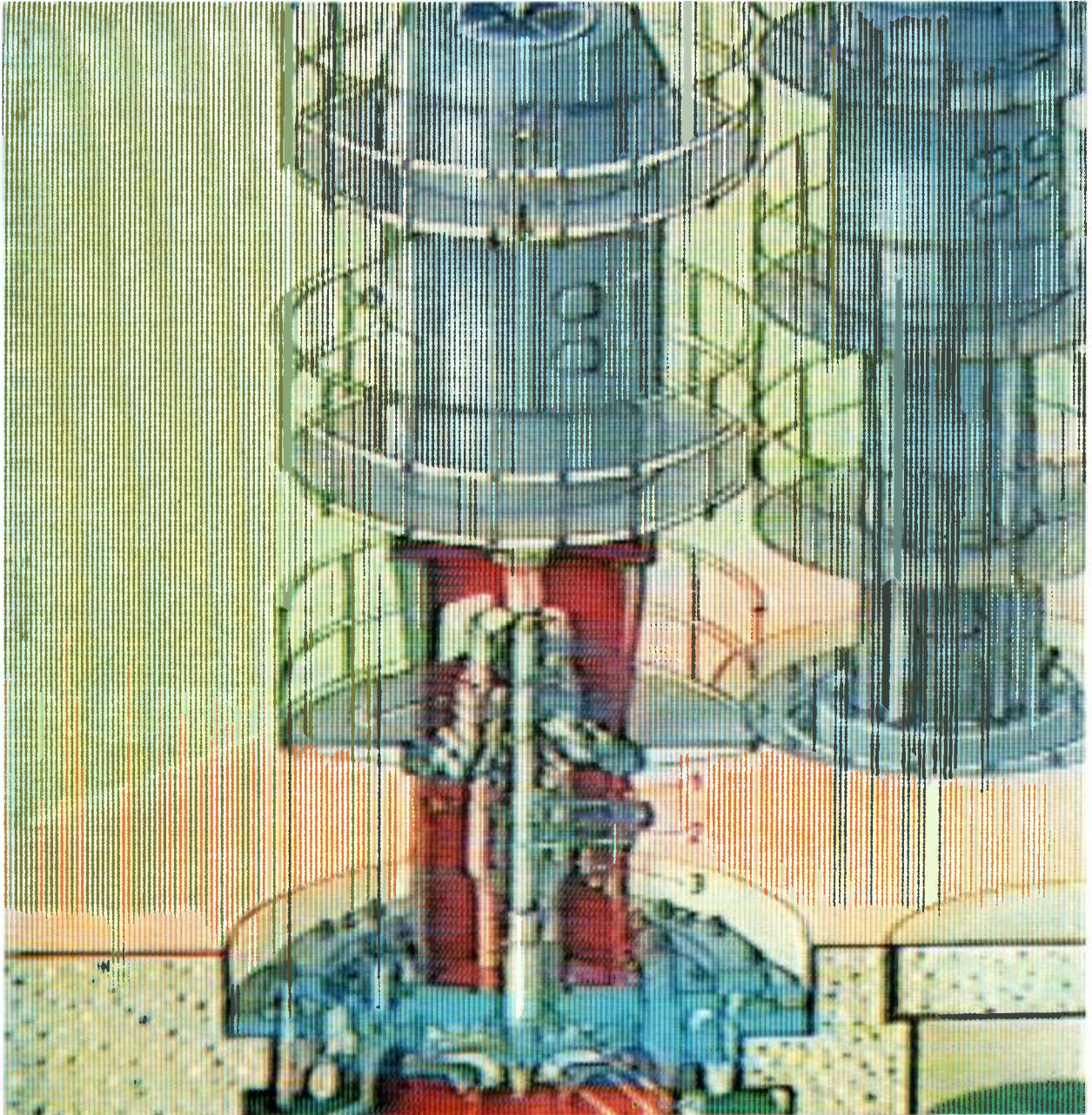
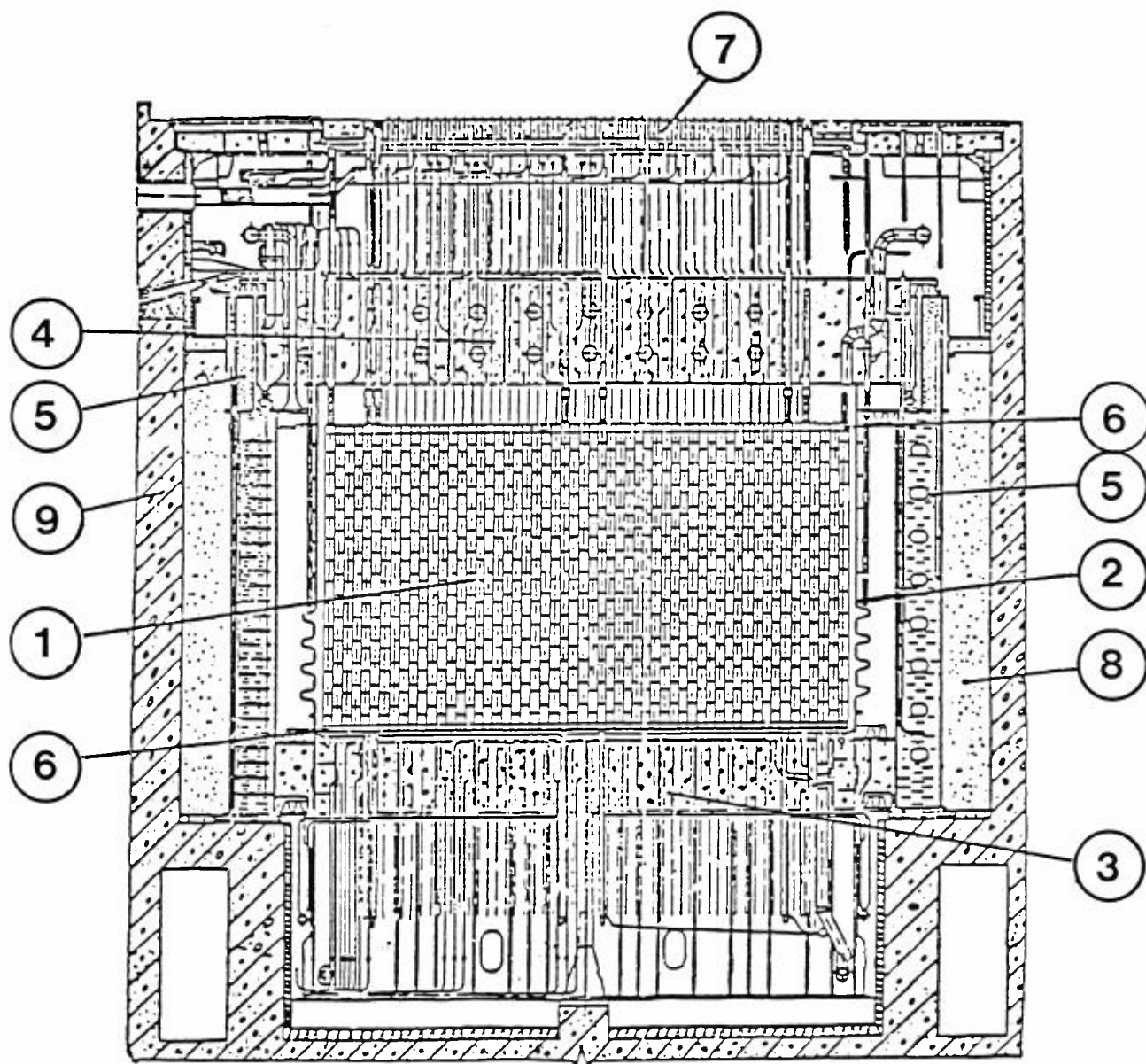


FIGURE 2-4 – MACHINE DE CHARGEMENT



- | | |
|-----|---|
| 1 | Blocs de graphite |
| 2 | Enveloppe d'acier |
| 3-4 | Structures tubulaires (dalles) supérieure et inférieure |
| 5 | Réservoir d'eau annulaire |
| 6 | Blocs d'acier en tête et pied des colonnes |
| 7 | Dalle de chargement |
| 8 | Sable |
| 9 | Cavité du réacteur. |

FIGURE 2-9. – LA CAVITE CŒUR

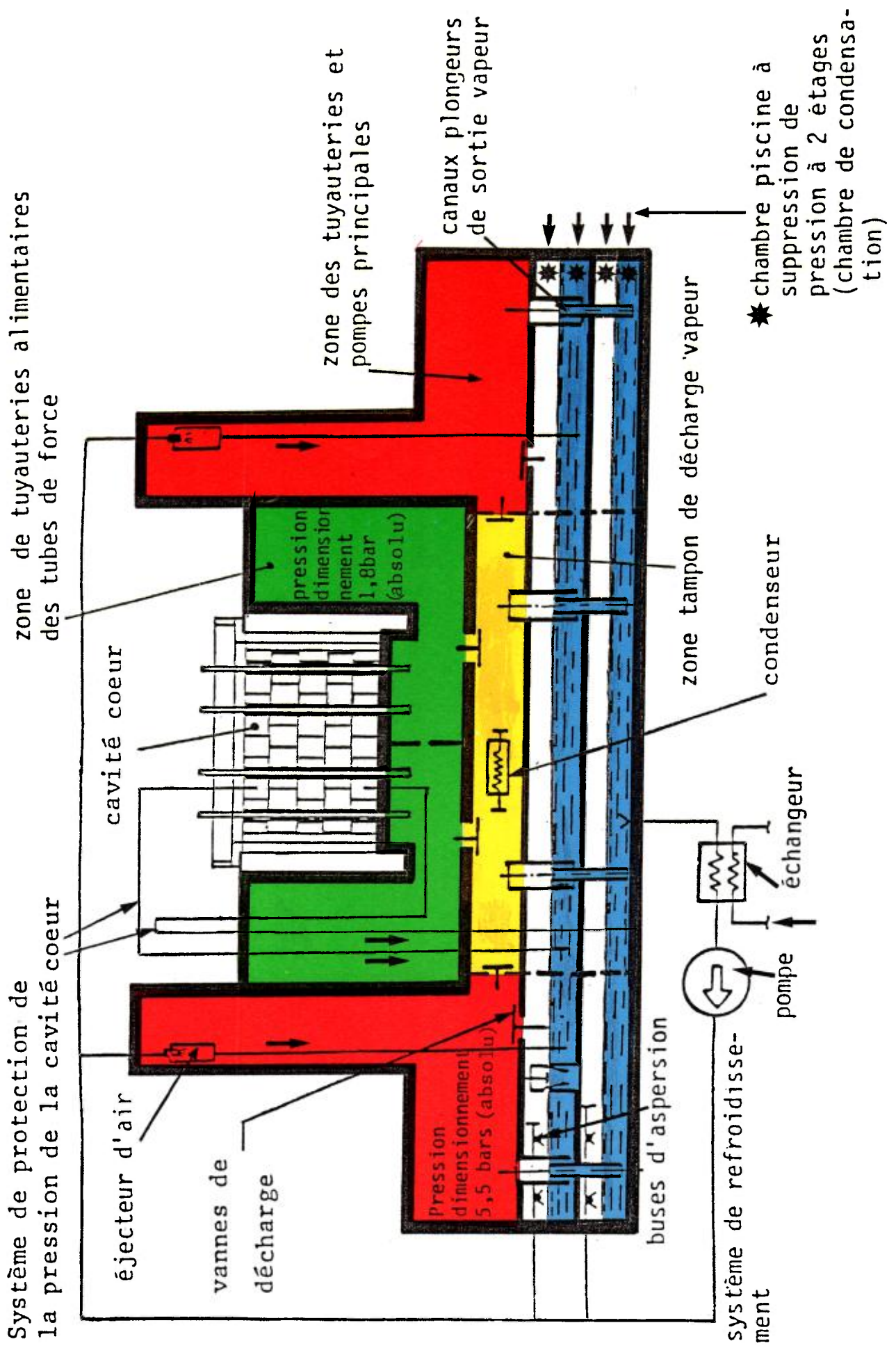


FIGURE 2-10. – PRINCIPE DE LA CONCEPTION MODULAIRE DU CONFINEMENT

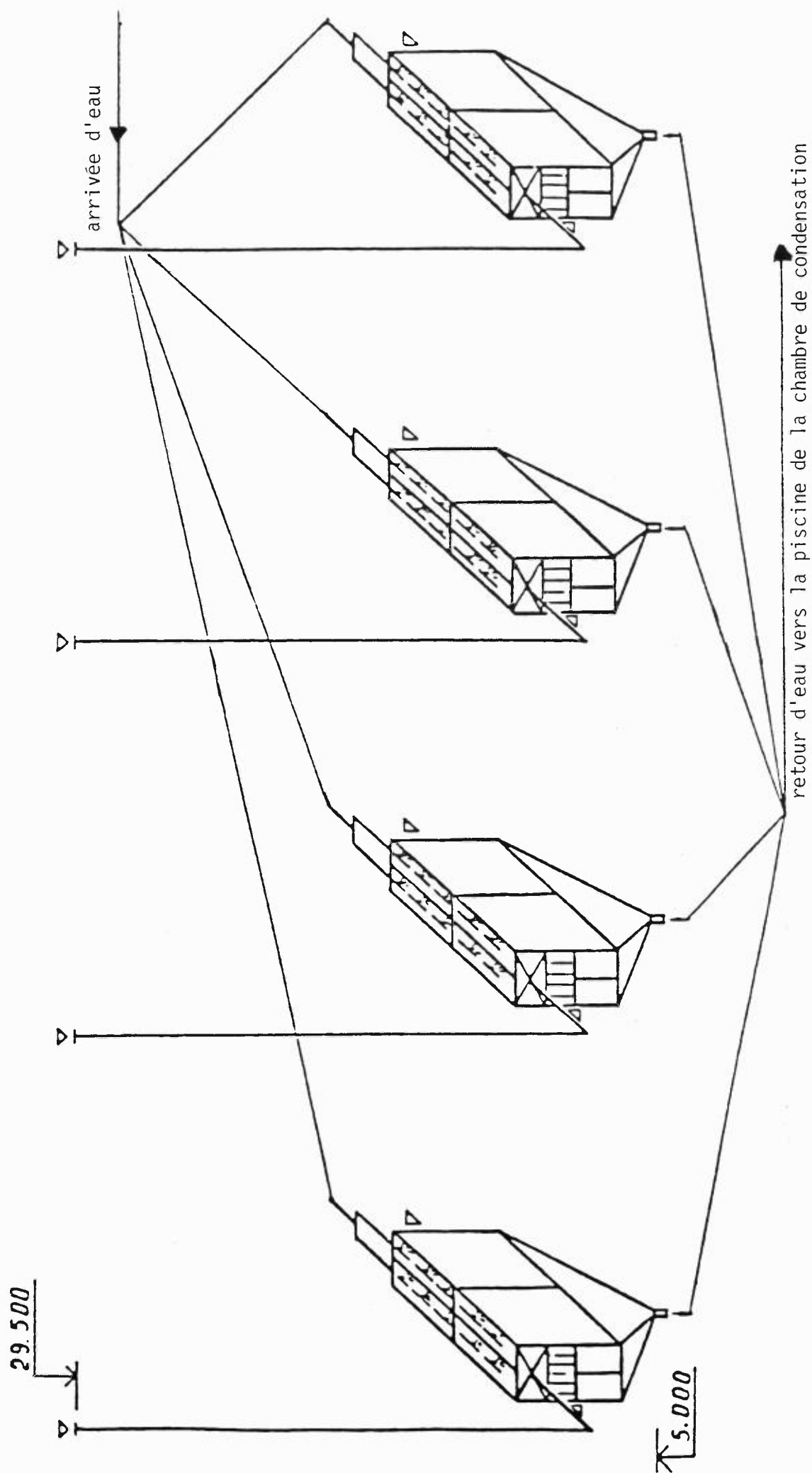


FIGURE 2-11. – SYSTEME DE CIRCULATION D'AIR FORCE D'UN LOCAL DES POMPES PRINCIPALES
(4 x 4 éjecteurs d'air)

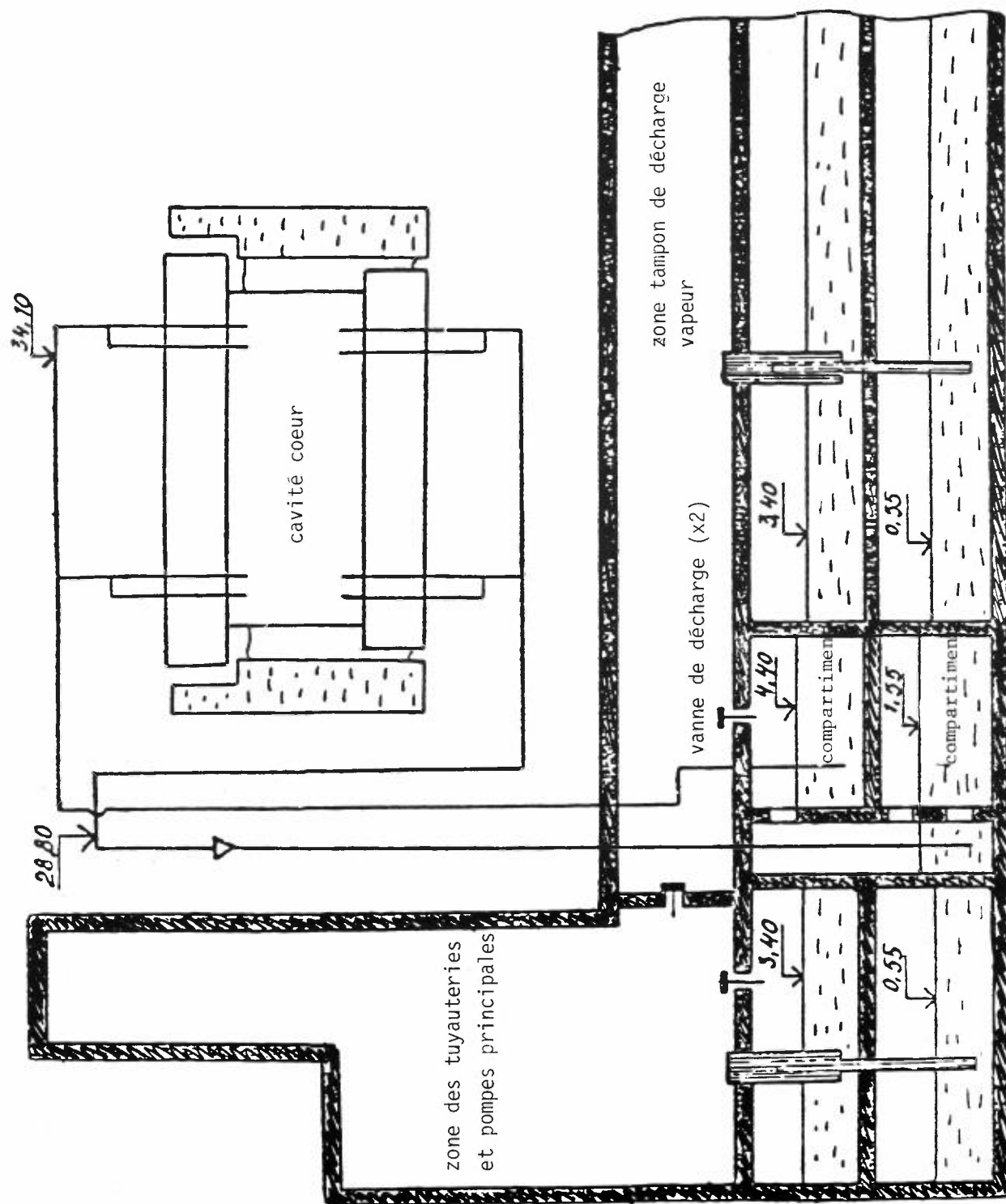


FIGURE 2-12. – SYSTEME DE PROTECTION DE LA PRESSION DE LA CAVITE CŒUR

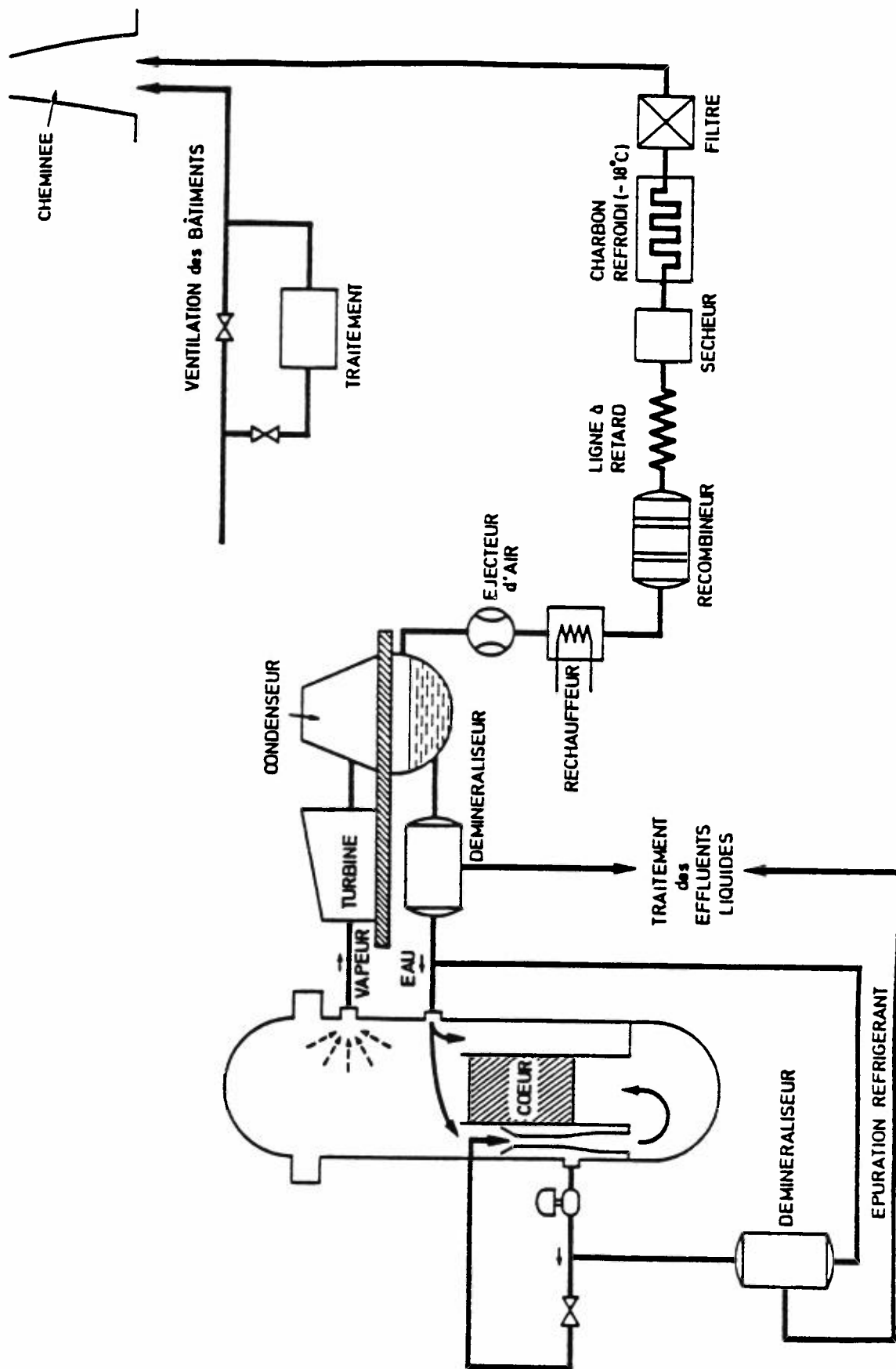


FIGURE 2-13. – BWR : PRINCIPALES SOURCES D'EFFLUENTS GAZEUX

3. – LE SCENARIO DE L'ACCIDENT

La tranche 4 de la centrale de **Tchernobyl** était en fonctionnement depuis décembre 1983, avec un facteur de charge très élevé, le meilleur des tranches de la filière RBMK. Il était prévu d'effectuer les 25 et 26 avril 1986 un essai spécial avant d'arrêter la tranche pour entretien normal. Le but de l'essai était de démontrer la possibilité d'alimentation électrique du système de refroidissement de secours par les turboalternateurs en cas de perte du réseau avant la reprise en secours par les diesels. Des essais précédents n'avaient pas été probants car la tension tombait trop rapidement. Un nouveau système de régulation de tension était donc installé. L'essai consistait à fermer l'alimentation en vapeur d'un turboalternateur et à tester sa capacité d'alimentation pendant son ralentissement sur inertie ; deux des quatre pompes principales de recirculation de chaque boucle étaient utilisées comme charge électrique du turboalternateur et devaient donc ralentir pendant l'essai.

Après abaissement de la puissance, le premier turboalternateur a été découplé. Mais en raison du délai demandé par le "dispatching", la baisse de puissance jusqu'au niveau de 700 - 1000 MWe, où l'essai devrait être réalisé, n'a pu se poursuivre que tard dans la nuit du 25 au 26 avril. Le détail des événements est donné dans le tableau joint avec quelques commentaires, et l'évolution des paramètres physiques du cœur est schématisée sur la figure 3-1.

Le retard dû au "dispatching" est un événement imprévu qui, en lui-même, n'affecte pas grandement la suite des événements. Cependant, on peut noter que ce n'est sans doute pas l'équipe de quart prévue initialement qui réalisera l'essai. Par contre, juste avant l'essai, le système de refroidissement de secours avait été isolé et les opérateurs l'ont laissé isolé pendant les neuf heures où la tranche est restée à mi-puissance. Cette attitude de violation délibérée des procédures normales va apparaître tout au long de la suite des événements.

A 23 h, la réduction de puissance est reprise et peu après un autre événement anormal se produit : l'opérateur fait une erreur de manipulation et le contrôle automatique du réacteur est perdu. Sa puissance tombe rapidement à 30 MWth, d'autant plus rapidement que l'ébullition, donc le vide, décroît dans le réacteur. L'opérateur monte manuellement beaucoup de barres de contrôle et réussit à ramener difficilement la puissance à 200 MWth. Il était connu qu'à une puissance inférieure à 700 MWth, le réacteur est très difficile à contrôler, car une faible variation de puissance entraîne une variation importante du volume de vapeur. Il était donc interdit de fonctionner de façon continue au-dessous de 700 MWth.

La position des barres de contrôle a également une grande importance. Plus elles sont retirées, plus le coefficient de vide est positif. Si on augmente la puissance, la température du combustible augmente, lequel cède sa chaleur à l'eau ce qui augmente son taux d'ébullition. Le coefficient de température du combustible est négatif tandis que le coefficient de vide est positif dans un réacteur RBMK. L'effet résultant dépend du niveau de puissance. Pour le réacteur RBMK, l'effet global est négatif à pleine puissance et devient positif au dessous de 10 % de la puissance nominale. L'opérateur a ainsi violé les procédures en restant à 200 MWth et en sortant un trop grand nombre de barres de contrôle.

Après le démarrage de la quatrième pompe de chaque boucle, le débit dépasse les limites permises en raison de problèmes de cavitation. L'opérateur, devant la difficulté de maintenir le niveau et la pression dans les séparateurs, a bloqué les signaux d'arrêt d'urgence concernant ces paramètres, ce qui est une nouvelle violation.

Avant de réaliser l'essai, et dans le but de le répéter si nécessaire, l'opérateur a bloqué le signal d'arrêt d'urgence sur perte du deuxième turboalternateur. Ceci est une violation très grave ; en effet, même dans les conditions très particulières où se trouvait le réacteur, il aurait été arrêté de façon sûre dès l'engagement de l'essai. Les seuls signaux de protection encore en fonctionnement sont les seuils "haute puissance" et "basse période". La fermeture des vannes d'admission à la turbine marque le début de l'essai. Le ralentissement du débit dans le cœur entraîne rapidement une augmentation du volume de vapeur et une augmentation de la puissance (fig.3-2). A 1 h 23' 40", le chef opérateur donne l'ordre d'insertion rapide des barres mais il est trop tard. L'efficacité des barres n'était pas suffisamment grande pendant les premières secondes d'insertion ; l'augmentation du vide a rendu le réacteur prompt-critique. Des calculs ont montré que la puissance aurait atteint 100 fois la puissance nominale en 4 secondes.

L'ampleur immédiate des destructions (figure 3-3) ainsi que les niveaux de température et de rayonnement ont empêché toute mesure. La description de la suite des événements résulte d'observations visuelles, de mesures de niveaux de rayonnement, d'expériences antérieures sur le comportement du combustible et de calculs post-accidentels.

Au moment de la première explosion :

- environ 30 % du combustible se fragmentent, conduisant à une interaction avec l'eau contenue dans les canaux, une brusque formation de vapeur et une augmentation de pression. De l'hydrogène peut avoir été déjà produit,
- un certain nombre de canaux sont détruits et différents matériels affectés : bouchons de chargement des canaux, tuyauteries d'entrée ou de sortie du réacteur,
- des matériaux (combustible, gaine, éléments de canaux) sont éjectés au travers de la dalle supérieure.

2 à 5 secondes plus tard :

- il y a accroissement de la pression dans la "boîte réacteur" due à la vapeur provenant du circuit primaire et celle produite pendant et après la fragmentation du combustible. Cette pression pourrait avoir atteint plusieurs dizaines de bars,
- la dalle supérieure (1 000 t) se soulève (une surpression de 2 bars suffit à ce soulèvement) rompant **tous** les canaux de combustible, entraînant les barres de contrôle et cassant les tuyauteries horizontales,
- une seconde explosion intervient dont on ne connaît pas l'origine précise : seconde excursion de puissance ou explosion d'hydrogène,
- la dalle supérieure sera trouvée en position verticale, le pont roulant et la machine de chargement détruits,
- des observateurs extérieurs à la tranche voient fuser du réacteur 4 des débris incandescents dont une partie retombe sur la salle des machines, allumant plus de 30 foyers d'incendie,
- des blocs de graphite et des fragments de combustible sont éjectés hors du bâtiment du réacteur ; les blocs de graphite sont aussi déplacés radialement, endommageant la protection latérale d'eau.

Quelques informations et éléments d'analyse complémentaires sur ces points non totalement élucidés sont présentés en annexe à ce chapitre.

Quelques minutes après la première explosion :

- la vapeur et l'eau des différents réservoirs (circuit et protection) se répandent dans le volume du cœur et dans le compartiment sous le réacteur,
- des réactions de cette eau avec le graphite, le zirconium et le combustible ont dû survenir,
- à 1 h 30, les pompiers de **Pripyat** et de **Tchernobyl** se rendent sur les lieux. L'attaque des différents foyers d'incendie se fait d'abord pour éviter la propagation à la tranche 3 par le toit de la salle des machines, ce qui est obtenu dès 2 h 10.

Au cours du premier jour :

- les incendies sont maîtrisés à 5 h 00,
- de l'eau est injectée dans le réacteur pendant une demi-journée par les pompes d'alimentation des séparateurs à raison de 200 à 300 t/h. Cette injection sera arrêtée devant le risque d'inondation des tranches 1 et 2,
- de la vapeur s'échappe du réacteur,
- une circulation naturelle d'air s'établit, attisée par la haute température du cœur.
- la tranche 3 est mise à l'arrêt le 26 avril à 5 h 00, les tranches 1 et 2 le 27 avril à 1 h 13 et 2 h 13.

Du 2^{ème} au 10^{ème} jour :

- dès le 2^{ème} jour, des fumées noires apparaissent, indiquant des réactions avec le graphite. On estime que 10 % du graphite aurait brûlé, et peut être beaucoup plus,
- après avoir baissé (par transfert de chaleur), la température du combustible remonte vers 2 000° C (par dégagement de la puissance résiduelle),
- 5 000 tonnes de matériaux divers filtrants (sable, bore, argile, dolomite et plomb) sont déversées par hélicoptère, ce qui réduit le débit d'air et le relâchement des produits de fission,
- pour réduire l'action de l'oxygène et diminuer la température du graphite, de l'azote sous pression est injecté sous le réacteur à partir du 5 mai (10^{ème} jour).

CHRONOLOGIE DE L'ACCIDENT DE TCHERNOBYL

EVENEMENTS

25 avril 1986

1 H 00 – Début de baisse de la puissance

13 H 05 –

La puissance atteint 1600 MWth.
(50 % de la puissance nominale)
Le turboalternateur n° 7 est découplé.
L'alimentation des besoins propres du réacteur (4 pompes de circulation principale sur 8, 2 pompes alimentaires des ballons) est connectée au turboalternateur n° 8.

38

14 H 00 –

Le système de refroidissement de secours (ECCS) est isolé.

Peu après 14 H 00

A la demande du “dispatching”, la suite des opérations est suspendue et la tranche est maintenue à mi-puissance.

23 H 10 –

La réduction de la puissance est reprise.

26 avril 1986

0 h 28 –

Passage du système de régulation automatique locale au système de régulation automatique de puissance moyenne.

La puissance s'effondre à 30 MWth.

COMMENTAIRES

En vue de la préparation des essais et de l'arrêt programmé de la tranche.
L'essai prévu est un ralentissement sur inertie d'un turboalternateur à partir d'environ 800 MWth.

Ces pompes devront donc ralentir, pendant l'essai, en fonction du ralentissement et de la baisse de tension aux bornes du turboalternateur.

Le programme d'essai prévoyait cette déconnection. Mais cette exigence était inutile et complètement contraire aux règles.
L'ECCS reste déconnecté malgré le maintien du réacteur en puissance.

La puissance devait être réduite à environ 800 MWth avant de commencer l'essai.

Ce passage du système LAC au système AC est prévu à basse puissance.
Erreur de l'opérateur.
L'opérateur n'a pas “synchronisé” le système AC avec le système LAC avant commutation pour maintenir la puissance. Il n'y avait donc plus de régulation automatique.

1 H 00 –

La puissance est remontée à 200 MWth.

En raison de l'empoisonnement dû au Xenon la marge de réactivité est devenue faible, empêchant d'augmenter la puissance à la valeur requise pour l'essai, soit environ 800 MWth. L'opérateur a mis une demi-heure à stabiliser le réacteur. A ce moment la marge de réactivité est inférieure à l'équivalent de 30 barres.

Les règles étaient les suivantes :

- Seul l'ingénieur en chef peut autoriser une procédure avec une marge inférieure à 30 barres.
- Si la marge est inférieure à 15 barres, personne ne peut autoriser la poursuite de l'exploitation ; le réacteur doit être arrêté immédiatement et refroidi.

Il faut noter qu'un fonctionnement continu en-dessous de 700 MWth est interdit par les procédures de sûreté en raison de problèmes d'instabilité.

1 H 03 –

La 4^{ème} pompe de la boucle de circulation primaire gauche est démarrée.

Le programme d'essais prévoyait le démarrage de toutes les pompes primaires, de façon qu'à la fin de l'essai, il reste 4 pompes primaires en fonctionnement.

1 H 07 –

La 4^{ème} pompe de la boucle de circulation primaire droite est démarrée.

Ces démarrages entraînent un surdébit dans le cœur et sur certaines pompes. Cela réduit la formation de vapeur dans le cœur et fait chuter la pression dans les séparateurs. La température de l'eau s'approche de la saturation et le niveau des séparateurs baisse au-dessous du seuil d'alarme. Sur les pompes, on risque la cavitation.

Vers 1 H 15

L'opérateur bloque les signaux d'arrêt d'urgence concernant les paramètres pression et niveau des séparateurs.

L'opérateur veut mener l'essai jusqu'au bout.

1 H 19 –

L'opérateur commence à augmenter le débit d'eau alimentaire pour remonter les niveaux des séparateurs.

1 H 19.30

Le niveau dans les séparateurs commence à croître.

Le débit d'eau alimentaire a plus que triplé et excède largement le débit de vapeur. L'opérateur est manifestement pressé et ne tient pas compte du temps de réponse du système.

Les barres de contrôle automatique arrivent en position haute. L'opérateur monte les barres manuelles. La pression baisse légèrement.

1 H 19.58

Fermeture du contournement au condenseur.

1 H 21.50

Le débit d'eau alimentaire qui a atteint 4 fois le débit normal, est réduit brutalement.

1 H 22.10

Début de production de vapeur dans le cœur.
Introduction des barres de contrôle automatique.

1 H 22.30

Le débit d'eau alimentaire est stable à une valeur 1,5 fois inférieure au débit du régime stationnaire.
Sortie d'imprimante donnant la distribution de puissance et les positions des barres. La marge de réactivité constatée n'est que de 6 à 8 barres.

1 H 22.45

Les paramètres du réacteur sont à peu près stables (pression, qualité de vapeur, débits etc...).

L'eau froide atteint le cœur et réduit le taux de vapeur.

Le système de régulation de pression a cherché à la stabiliser en fermant le contournement au condenseur. En fait la pression a continué à baisser jusqu'au début des essais au total d'environ 5 bars.

Dans le but de stabiliser le niveau dans les séparateurs.

L'arrêt brutal du débit d'eau alimentaire, dont la température est inférieure de 100 °C à la température de l'eau des ballons, provoque l'arrivée d'un front d'eau plus chaude à l'entrée du cœur. En fait l'eau des ballons devait être proche de la saturation alors que, avant ce transitoire, le taux de vapeur dans le cœur était presque nul.

Erreur de l'opérateur.

La distribution axiale de puissance est à 2 bosses, la bosse supérieure étant plus importante en raison de la vapeur.

La dépression centrale est due à l'empoisonnement du Xénon. La marge de réactivité est largement inférieure à 15 barres qui est le seuil d'arrêt immédiat.

La décision est donc prise d'exécuter l'essai. Quand on examine la densité des événements et des actions de l'opérateur depuis 4 minutes, il vaut mieux parler d'un engrenage fatal que d'une vraie décision.

1 H 23.04

Fermeture des vannes d'admission de la turbine.

Le réacteur continue de fonctionner à 200 MWth car l'opérateur a, précédemment, bloqué le signal d'arrêt d'urgence sur arrêt des deux turbines.

Ceci est une violation cruciale de procédure. Le personnel a voulu se donner la possibilité de refaire l'essai si le premier n'était pas réussi.

1 H 23.10

Les barres de régulation montent pendant une dizaine de secondes.

La première conséquence de la fermeture des vannes vapeur est une augmentation de la pression de vapeur, ce qui provoque une contraction de la vapeur et donc une baisse de réactivité.

1 H 23.21

Les barres de régulation descendent jusqu'en butée basse, laquelle sera atteinte environ 20 secondes plus tard.

La réduction de débit dans le cœur, qui se poursuit en raison du ralentissement de l'alternateur ainsi que l'arrivée du front d'eau plus chaude à l'entrée du cœur, entraînent une augmentation du taux de vapeur dans le cœur. Le front d'eau plus chaude provient du fait que le débit d'eau alimentaire avait été brutalement réduit 50 secondes plus tôt.

Il faut remarquer que la boucle primaire est proche de la température de saturation et qu'une faible augmentation de puissance provoque une forte augmentation du taux de vapeur.

1 H 23.40

Les opérateurs donnent l'ordre d'insertion des barres.

Cette insertion a été largement inefficace. En effet les barres de régulation automatique sont déjà basses et les autres barres sont presque entièrement retirées, ce qui rend leur efficacité très faible sur le début de leur course. Il aurait fallu environ 6 secondes pour introduire une antiréactivité efficace.

1 H 23.43

Les alarmes "haute puissance" et "courte période" apparaissent.

L'excursion de puissance entraîne la crise d'ébullition et l'augmentation de la température des crayons combustibles.

La température du combustible augmente rapidement.

1 H 23.44

Le pic de puissance est atteint.

L'insertion de réactivité due à la vapeur, de l'ordre de 1000 pcm, est compensée par l'effet Doppler. Le pic de puissance atteint serait de l'ordre de 100 fois la puissance nominale, d'après les calculs de reconstitution soviétiques.

1 H 23.45

Brutale production de vapeur dans le cœur.

1 H 23.46

L'augmentation de pression fait éclater les canaux et la structure supérieure.

Les crayons combustibles se fragmentent et cèdent leur énergie à l'eau contenue dans les canaux. Cette pulvérisation intervient pour une énergie emmagasinée de 300 cal/g.

Les réactions entre le zirconium et l'eau ont produit de l'hydrogène. Tout ceci produit un feu d'artifice avec éjection de particules de combustible, de flammes.

La deuxième explosion entendue par les témoins peut être due, soit à une deuxième excursion de puissance, soit à une explosion de l'hydrogène.

Les soviétiques estiment que 30 % des canaux ont explosé.

°°

“ Les 2 dernières minutes ”

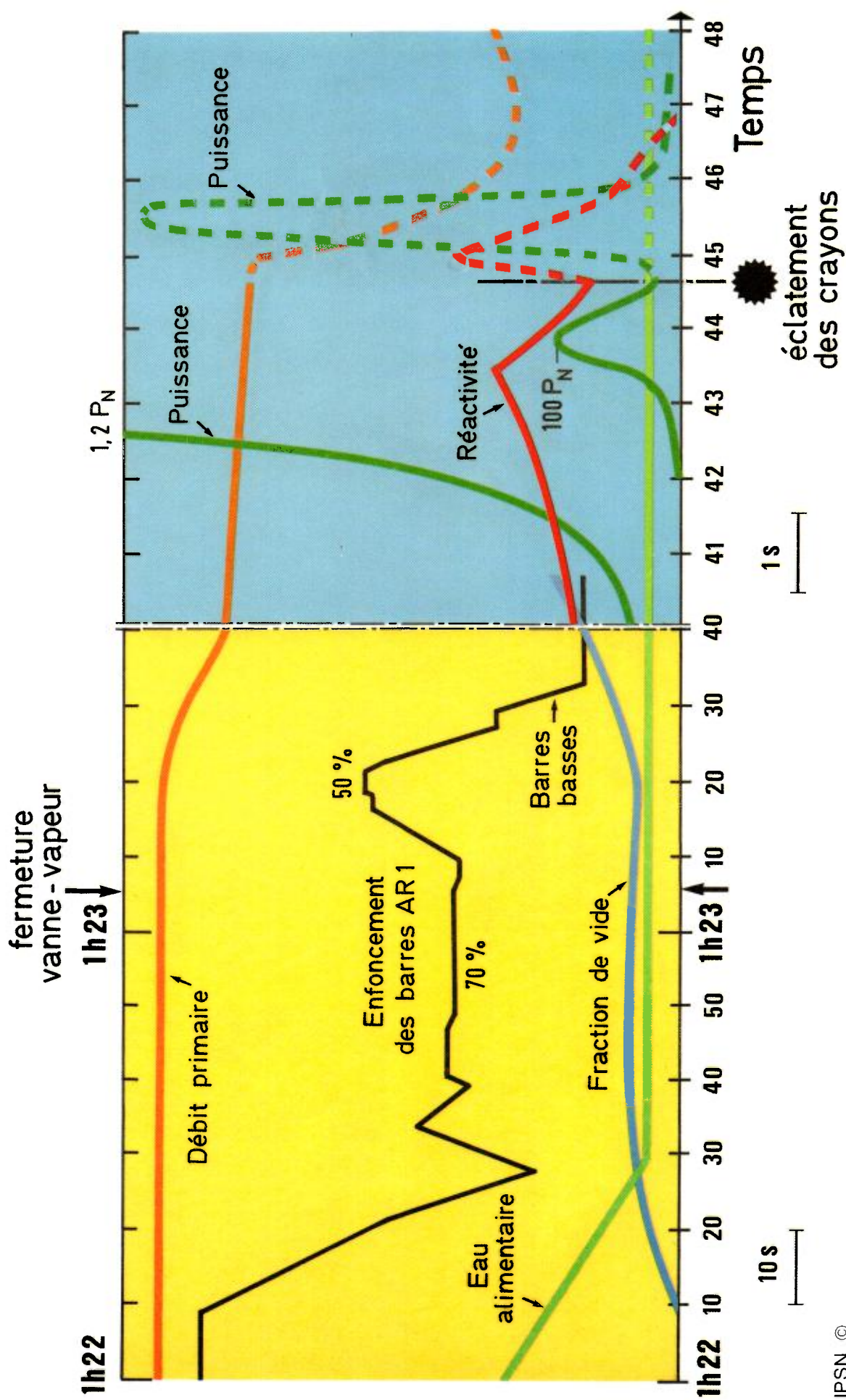
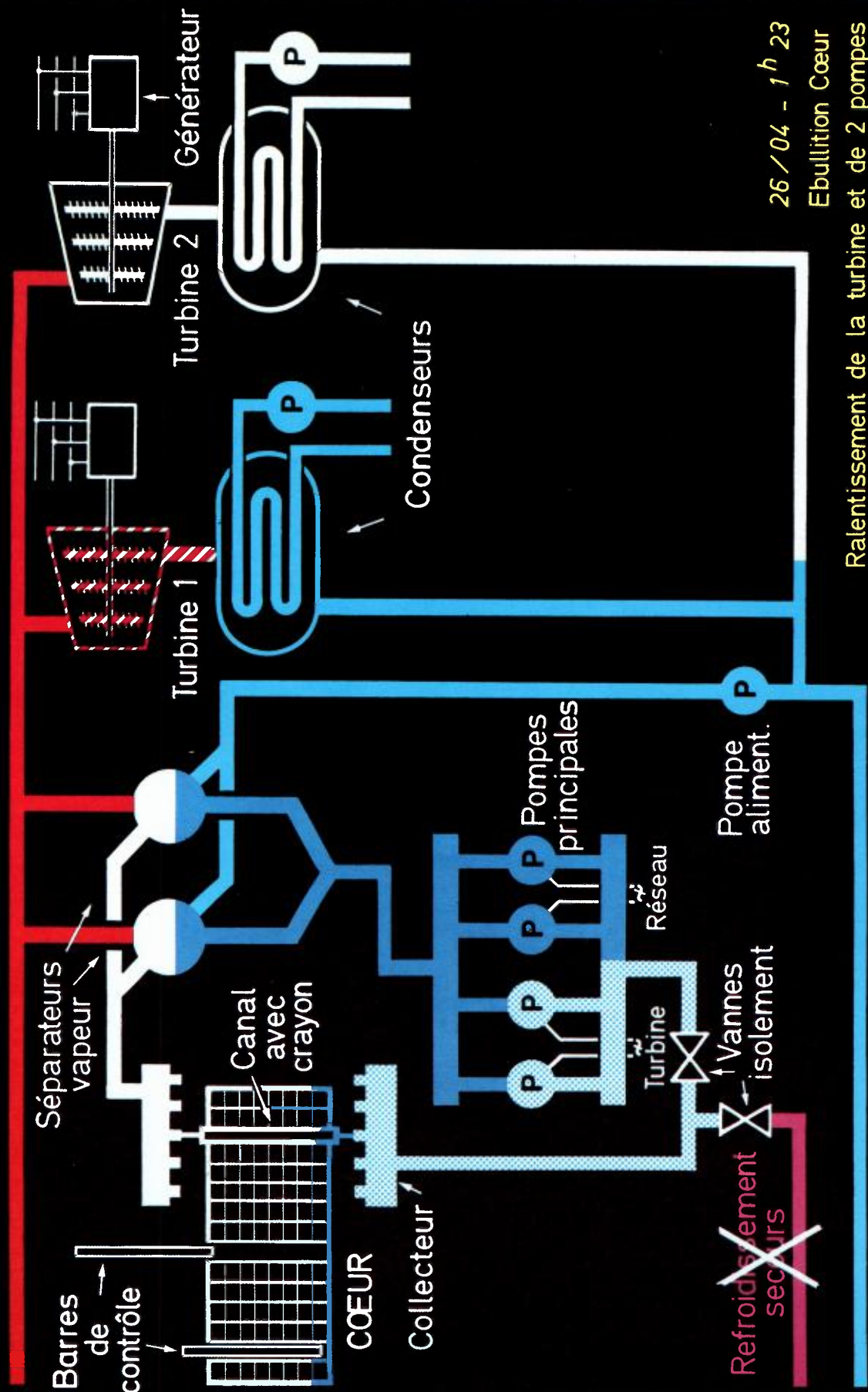


FIGURE 3-1 -

EVOLUTION de la SITUATION



26/04 - 1h 23

Ebullition Cœur

Ralentissement de la turbine et de 2 pompes

FIGURE 3-2 – DIMINUTION DU DEBIT DANS LE COEUR

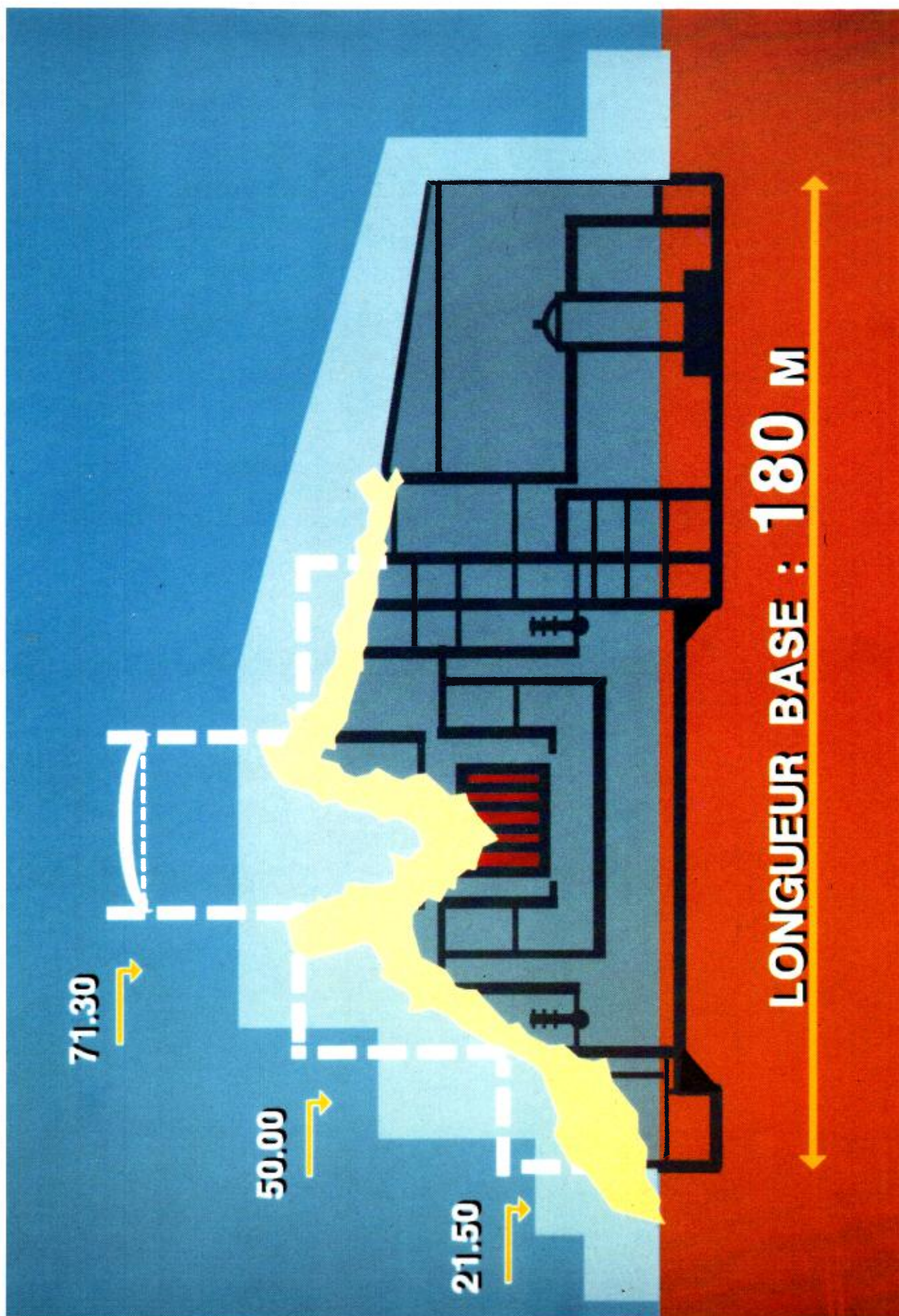


FIGURE 3-3 – VUE SCHEMATIQUE DE LA DESTRUCTION DE LA CENTRALE

Annexe du chapitre 3

Les deux explosions sur la tranche 4 de Tchernobyl.

Deux violentes explosions se sont produites, la première le 26 avril 1986 à 01 heure 23 minutes 44 secondes, la seconde 2 à 5 secondes plus tard.

L'analyse actuelle de ces événements conduit à attribuer la première explosion à un accident lié à la criticité du réacteur (reactivity initiated accident ou RIA) ; on ne connaît pas l'origine précise de la seconde explosion : nouvelle excursion de puissance ou explosion d'hydrogène ?

1°/ L'accident de criticité

Première explosion :

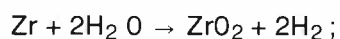
Au cours de cette excursion de puissance, le combustible génère une énergie qui n'a pas le temps de s'évacuer.

La valeur de 300 cal/g d'UO₂, donnée par les Soviétiques pour le pic d'enthalpie (énergie prompt) dans le combustible, semble être pour beaucoup de spécialistes une moyenne sur l'ensemble des pics d'enthalpie dans le cœur.

L'intensité de la première explosion donne en effet à penser, sur la base des résultats expérimentaux obtenus lors des essais SPERT et PBF aux Etats-Unis, et NSRR au Japon, que les pics d'enthalpie ont atteint 400 à 600 cal/g d'UO₂, dans certaines régions du cœur, projetant dans le réfrigérant de fines particules d'UO₂ fondu qui provoquent alors une violente explosion de vapeur. Le spectre des tailles des particules d'UO₂ est fonction de l'énergie déposée (fig. A3.1) et la fraction de l'énergie nucléaire convertie en énergie mécanique dépend de la taille des particules (fig. A3.2) ; pour les forts dépôts d'énergie envisagés ci-dessus, un taux de conversion de l'ordre de 1 % semble un majorant raisonnable.

Si l'on fait l'hypothèse que lors de l'accident, un pic d'enthalpie d'au moins 400 cal/g d'UO₂ affecte 30 % du combustible, une estimation de l'énergie mécanique produite par interaction violente combustible-réfrigérant est de l'ordre de 1 GJ, soit l'équivalent de l'énergie libérée par l'explosion de 250 kg de TNT. Cette dernière valeur est à considérer comme un ordre de grandeur pour l'évaluation des effets, les cinétiques de montée en pression pour les deux types d'explosions (explosion de vapeur suite à un RIA et de TNT) n'étant pas les mêmes.

De plus au cours de cet accident de criticité, une fraction de gaines de zircaloy s'est oxydée au contact de la vapeur d'eau, libérant de l'hydrogène, selon la réaction :



(réaction exothermique enthalpie $H = - 586$ kJ/mole Zr)

La masse de zirconium des gaines dans la tranche 4 de **Tchernobyl** est de l'ordre de 50 t et la surface d'échange combustible-réfrigérant de l'ordre de 9000 m². comme le montre le tableau A3.3.

Faisant l'hypothèse qu'au cours du RIA la production d'hydrogène est équivalente à celle résultant de l'oxydation à 2000 ° C pendant 5 secondes de 30 % du gainage, on aboutit - en extrapolant la loi d'oxydation du Zr de Baker-Just (fig. A3.4) - à un dégagement d'hydrogène de près de 75 kg. Il s'agit là encore d'un ordre de grandeur.

2°/ La deuxième explosion

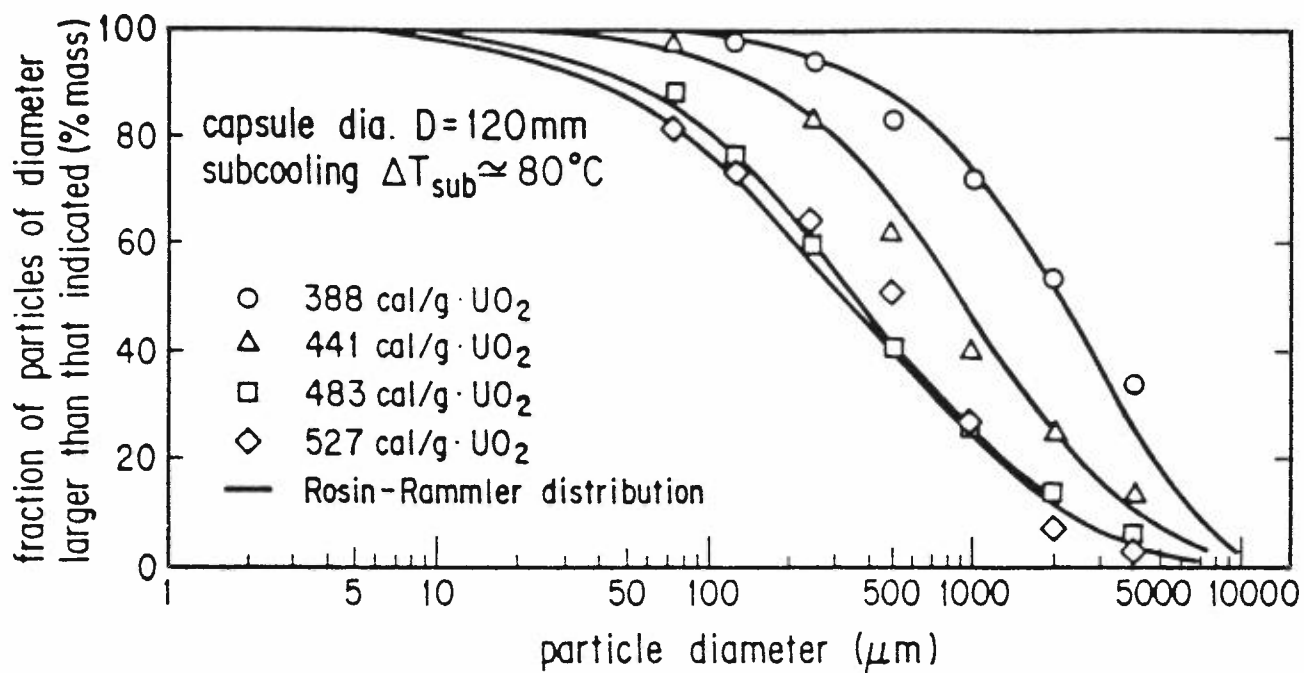
Son origine n'est pas claire aujourd'hui (deuxième excursion de puissance ou explosion d'hydrogène, selon les Soviétiques eux-mêmes). Nous n'examinons ici que l'effet de l'explosion la plus sévère de l'hydrogène supposé émis lors du RIA.

La combustion complète d'une masse d'hydrogène pur de 75 kg, mélangée à de l'air, en conditions stoechiométriques (29 % d'hydrogène en volume), libère une énergie thermique de 10 GJ.

Pour évaluer la surpression de champ libre produite par la détonation d'un mélange air-hydrogène, on utilisera la fig A3.5. où sont reportés divers résultats d'expériences.

Sur cette planche a été portée en abscisses une échelle des distances (exprimées en m) au centre d'une sphère de mélange air-hydrogène stoechiométrique contenant 75 kg d'hydrogène.

On constate que le niveau de la surpression incidente correspondant à l'explosion de la sphère précédente est de 2 bars à près de 15 m de son centre. Une structure de construction courante, sans spécification particulière de tenue à la pression, ne résiste pas à une telle surpression (fig. A3.6).

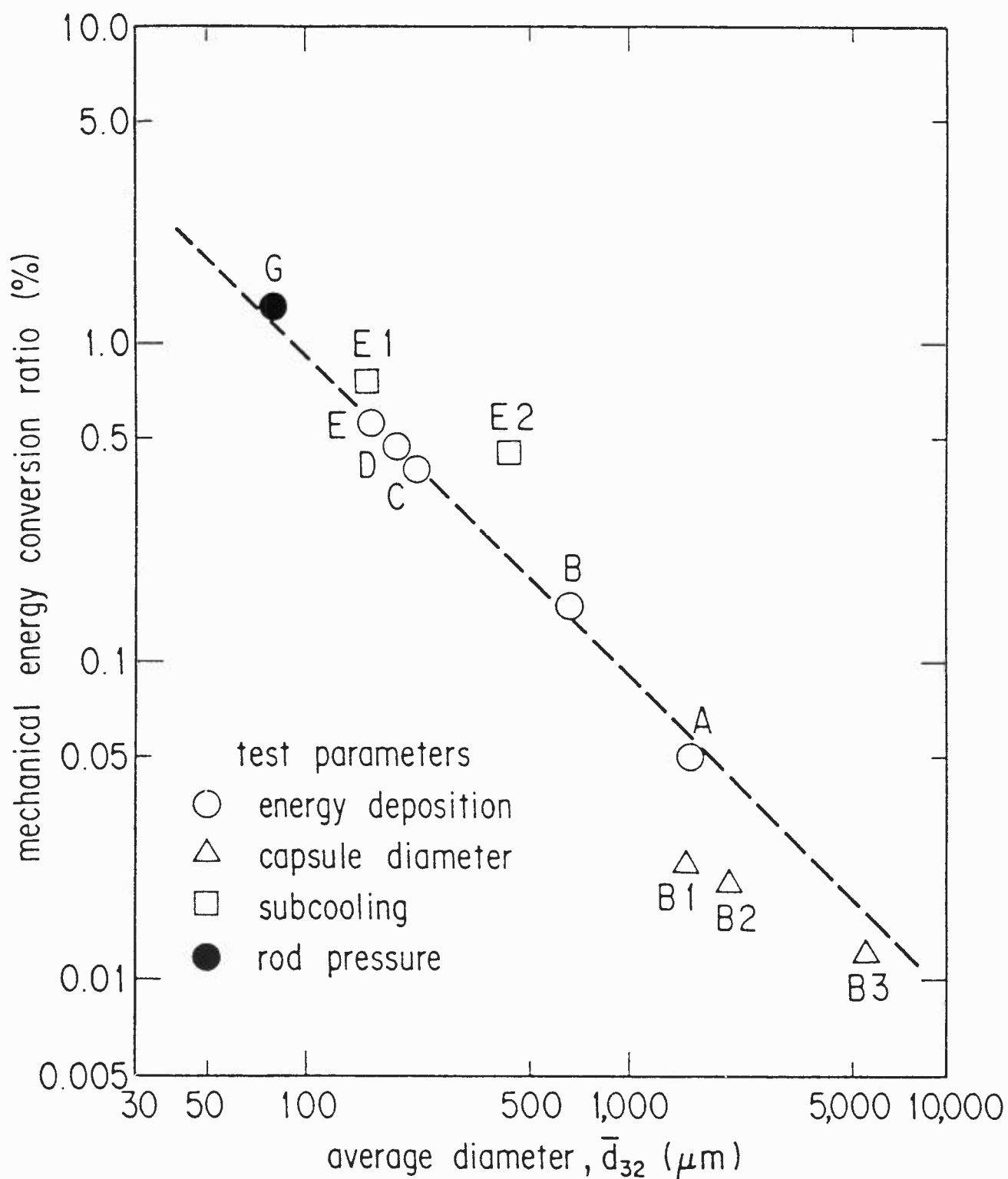


(a) energy deposition parameter test

Distribution des diamètres de particules d' UO_2 émises lors d'un RIA en fonction de l'énergie déposée.

Origine : Essais NSRR (JAERI) - Octobre 1984

FIGURE A-3-1



Taux de conversion de l'énergie nucléaire en énergie mécanique lors d'un RIA, en fonction du diamètre moyen des particules d' UO_2 éjectées dans le réfrigérant (explosion de vapeur).

Origine : Essais NSRR (JAERI) - Octobre 1984

FIGURE A-3-2

COMPOSITION DU COEUR

		Par canal actif	Totaux canaux actifs
Masse d'UO ₂ (kG)		120,5	204000
Masse de graphite (t)		0,654	1100
Masse (kG) Zr de l'assemblage	Gaines	29,4	49780
	Tube de maintien	5,9	9983
Masse Zr tube de force (kG)		48,4	81938
Masse totale de Zr (kG)		83,7	141701
Volume H ₂ (m ³)* Zr-H ₂ O		41,1	70000**

Nombre de canaux actifs : 1693

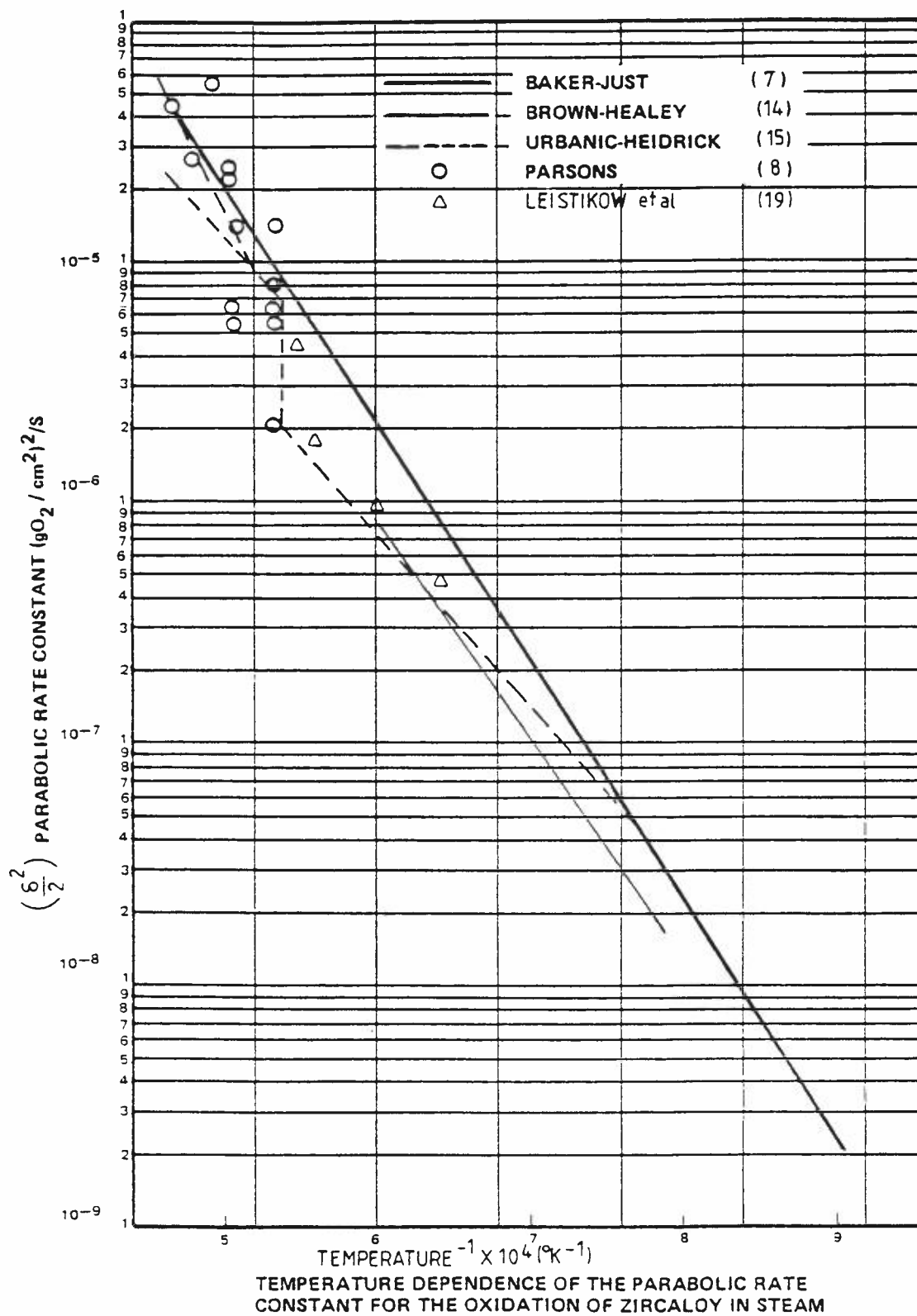
Masse totale de graphite : 1700 t

* Volume théorique fourni par la réaction complète $\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2$

** Soit 6,25 t d'hydrogène, c'est à dire environ 6 fois plus
que pour un REP de 1300 MWe

NB : Les valeurs rapportées dans le tableau concernent
uniquement les 7 mètres de coeur actif.

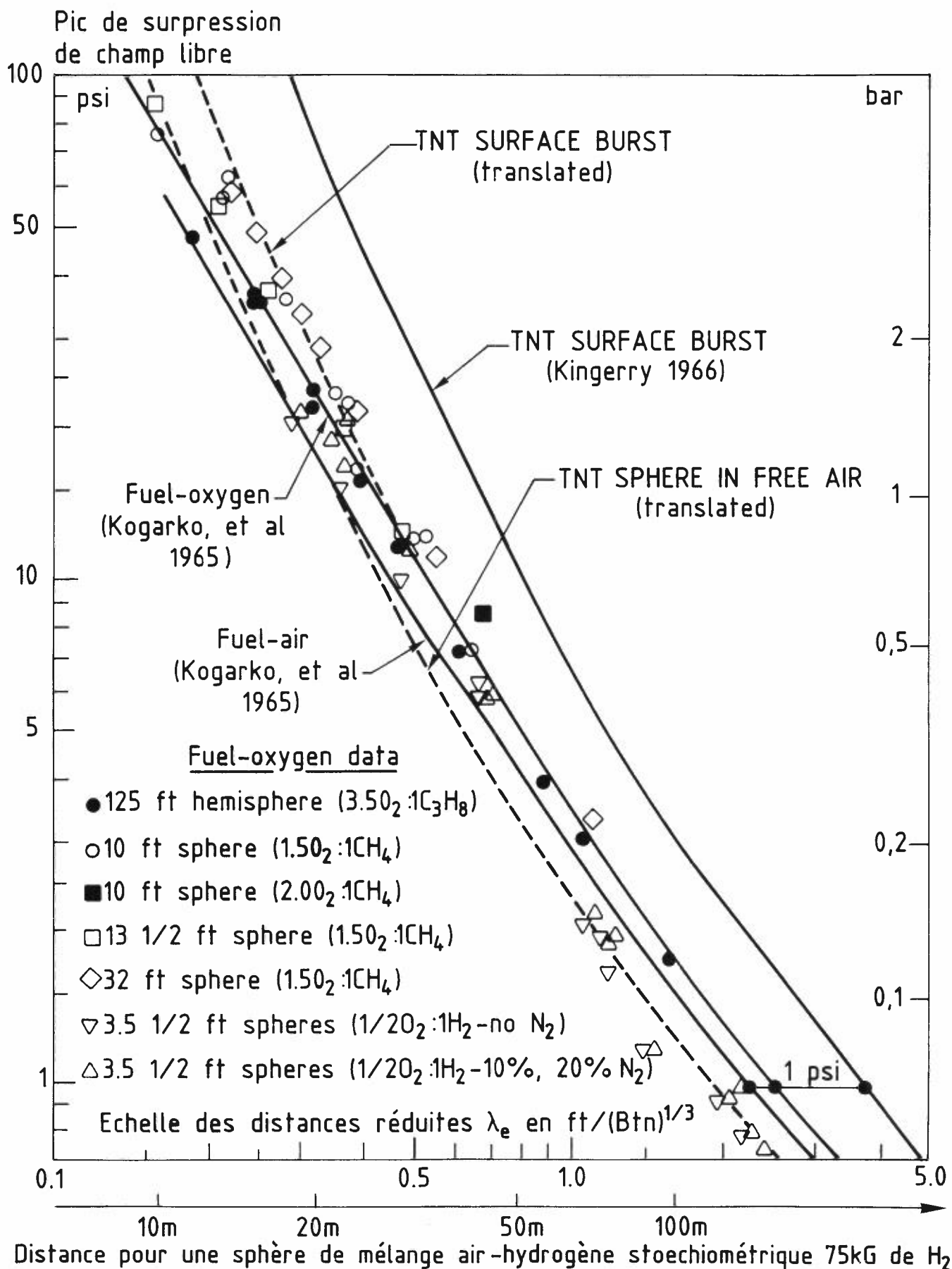
FIGURE A-3-3



$$W^2 = \left(\frac{\delta^2}{2}\right) \times t \text{ avec } \begin{cases} W: \text{Masse d'oxygène absorbée par Zr} \\ \text{(en g/(cm}^2\text{))} \\ t: \text{Temps à la température T(sec)} \end{cases}$$

La masse d'hydrogène libérée est 8 fois plus faible que la masse de O₂ absorbée

FIGURE A-3-4



PEAK OVERPRESSURE-ENERGY SCALED DISTANCE FOR VAPOR PHASE
AND TNT DETONATIONS (EICHLER AND NAPADENSKY 1977)

FIGURE A-3-5

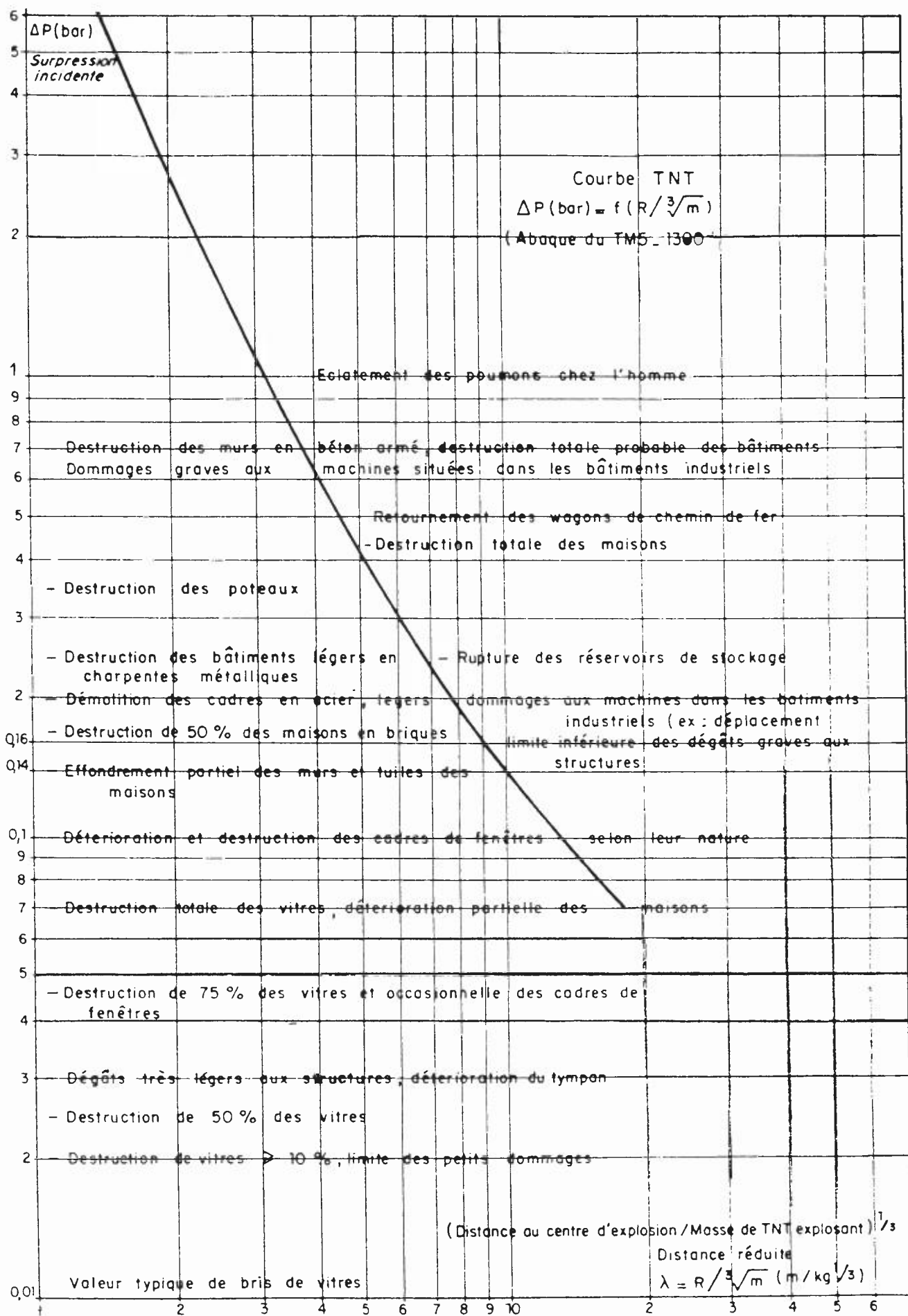


FIGURE A-3-6

4. – LES CAUSES DE L'ACCIDENT

Il apparaît clairement que l'accident a été causé par des erreurs et violations des règles de conduite par les opérateurs, en conjonction avec des caractéristiques particulières du réacteur qui ont amplifié les erreurs et conduit à la catastrophe.

Dès la préparation de l'essai, on observe de sérieuses carences. Il n'a pas donné lieu à un examen sérieux au plan de la sûreté et n'a pas fait l'objet d'une autorisation du groupe de sûreté de la centrale. Les procédures d'essais étaient mal étudiées du point de vue de la sûreté ; en fait toute l'initiative a été laissée aux ingénieurs en électrotechnique en presumant que l'essai était purement électrique et sans influence sur la sûreté. Le programme prévoyait ainsi d'importantes dérogations et donc une nette diminution du niveau de sûreté, comme l'arrêt du système d'injection d'eau de secours et le démarrage des 8 pompes primaires.

Durant le déroulement de l'essai de nombreux signaux du système de protection ont été successivement débranchés :

- arrêt de l'injection de secours,
- coupure de l'arrêt d'urgence sur arrêt de la deuxième turbine,
- coupure de l'arrêt d'urgence sur les alarmes de niveau et de pression dans les séparateurs.

De plus, les opérateurs ont accepté de fonctionner hors des limites autorisées et des spécifications techniques d'exploitation :

- fonctionnement sans injection de secours pendant 9 heures,
- fonctionnement prolongé à une puissance inférieure à 700 MWth,
- la réserve de réactivité a été largement inférieure à l'équivalent des 30 barres de contrôle,
- débit d'eau alimentaire égal à un moment donné à 3 à 4 fois le débit de vapeur,
- puis diminution de ce débit 1,5 fois au dessous du débit d'équilibre,
- fonctionnement en surdébit des pompes primaires, hors des limites permises pour éviter la cavitation,
- démarrage de l'essai malgré l'information du calculateur sur la marge de réactivité qui imposait l'arrêt immédiat,

La seule erreur de l'opérateur, au sens où on l'entend habituellement en France, est son insuccès dans le changement du type de régulation à 0 H 28.

Les caractéristiques particulières du réacteur ont amplifié les effets des "erreurs" précédentes. Le coefficient de vide positif du réacteur RBMK impose de limiter strictement les conditions de fonctionnement. Le système de protection automatique, dans les réacteurs modernes, est conçu pour mettre fin rapidement à des transitoires anormaux résultant soit de défaillances, soit d'actions erronées de l'opérateur. Les transitoires de réactivité notamment, pouvant conduire à des excursions rapides de puissance, doivent être stoppés immédiatement et automatiquement par des systèmes redondants diversifiés et très fiables. Dans les réacteurs RBMK, on a fait plus confiance à l'action de l'opérateur qu'à un système automatique considéré, à l'époque de la conception, comme moins fiable.

Différentes mesures ont d'ores et déjà été prévues par les soviétiques pour rendre les réacteurs RBMK moins vulnérables aux erreurs et violations délibérées. Toutes les barres comporteront une limite minimale d'insertion de 1, 2 m et 70 à 80 barres resteront dans le cœur. Ces deux mesures réduiront le coefficient de vide et augmenteront l'efficacité des barres. A plus long terme, l'enrichissement de l'uranium sera porté de 2 à 2,4 % et le cœur sera doté de barres absorbantes supplémentaires. De plus, un système d'arrêt à action rapide a été mis à l'étude.

°°

5. – L'INTERVENTION ET LES CONSEQUENCES SUR LE SITE ET L'ENVIRONNEMENT

A la suite de l'explosion du réacteur et de l'éjection d'une partie des matériaux du cœur radioactif dans l'environnement, les Soviétiques ont été amenés à réaliser toute une série d'interventions pour en pallier, autant que faire se pouvait, les différentes conséquences.

Il est important d'essayer de répertorier ces différentes interventions échelonnées dans le temps et qui sont d'ailleurs loin d'être terminées. L'analyse des contre-mesures s'appuie, pour l'essentiel, sur le rapport soviétique publié sur l'accident (1) et sur le document établi par l'INSAG à l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (2). Réalisé à partir du premier rapport avec l'aide des experts soviétiques, ce second texte en diverge toutefois sur des points mineurs.

Les interventions après l'accident ont pris des formes très diverses selon leur objet mais, en pratique, elles ont concerné quatre sujets distincts :

- le réacteur et ses auxiliaires, dont il fallait, d'une part, maîtriser l'incendie et, d'autre part, confiner la radioactivité,
- les populations qu'il a fallu protéger puis évacuer dans les heures et les jours qui suivirent l'explosion initiale,
- les sols et les cultures dont il fallait éliminer les dépôts radioactifs ; cette action de longue haleine est loin d'être achevée,
- les eaux souterraines dans lesquelles il était important de minimiser la diffusion de la radioactivité.

5.1. LE CONFINEMENT DU REACTEUR

5.1.1. Les interventions immédiates.

La première contre-mesure réalisée dans les minutes qui suivirent l'accident, fut la lutte contre l'incendie (graphite mis à part). Il s'agissait de préserver ce qui pouvait l'être des dispositifs communs aux réacteurs 4 et 3, du réacteur 3 lui-même et d'empêcher le sinistre de s'étendre aux autres tranches.

Suite à l'explosion à 1 heure 23 minutes le 26 avril, le feu prit en plus de trente endroits du hall des turbines et il fallut empêcher les flammes de se propager aux autres installations. Cette opération fut menée très rapidement car les foyers étaient circonscrits à 2 heures 10 minutes dans le hall, à 2 heures 30 minutes sur le toit du réacteur et le feu était totalement éteint à 5 heures par les équipes de la centrale et les pompiers venus de **Pripyat** et **Tchernobyl**.

Il y a lieu de relever la rapidité de l'action qui a permis d'arriver très vite à bout des feux mais qui, réalisée sans protection efficace contre les radiations, a conduit au décès de près de trente victimes.

5.1.2. La limitation des conséquences sur le cœur

Une série de contre-mesures à très court terme a eu pour but de confiner la radioactivité dans l'installation (le feu de graphite contribuait à rejeter des quantités importantes de radioactivité). Elles ont consisté en :

- une tentative de remise en fonctionnement du refroidissement du cœur par injection d'eau à l'aide des pompes de secours. Elle a été infructueuse car l'eau n'a pas pu pénétrer dans le cœur à cause de la destruction des tubes de force ; elle a donc envahi les autres parties du circuit primaire et s'est même écoulée vers les unités 1 et 2, entraînant un transfert de la radioactivité. L'opération a été stoppée dès cette constatation,
- dès le 28 avril, le déversement, par hélicoptères, dans le cratère formé lors de l'explosion du réacteur, d'un mélange de matériaux appropriés (carbure de bore : 40 tonnes, dolomite : 800 tonnes, argile et sable : 1800 tonnes, plomb : 2400 tonnes) dans le but d'étouffer le feu de graphite, d'arrêter les rejets et de réduire le rayonnement du bâtiment. Cette opération a été rapidement menée et couronnée de succès puisqu'on a constaté une décroissance rapide des rejets radioactifs entre le 28 avril et le 6 mai. Il est possible que le poids de ces matériaux ait constitué, aux yeux des Soviétiques, une menace pour la tenue des planchers de béton situés sous le bloc réacteur soumis en même temps à des contraintes thermiques. Cela a pu contribuer à la mise en œuvre de la parade mentionnée ci-après.
- l'injection d'azote pour le refroidissement du réacteur au moyen d'un système installé les 4 et 5 mai utilisant les tuyauteries installées au-dessous du réacteur. L'autre but de cette contre-mesure était de chasser l'oxygène présent alimentant le feu du graphite. Cette parade a été également efficace puisque, dès le 6 mai, la température du cœur a baissé. Le 10 mai 1986, cette opération avait été présentée par les responsables comme une tentative de gel du sol,
- malgré les résultats des opérations mentionnées ci-dessus, et les indications des calculs effectués, mise en œuvre d'une parade à une éventuelle fusion du cœur suivie d'une traversée du radier, malmené par l'explosion et la surcharge exposée ci-dessus. A partir d'une galerie, commencée très vite après l'accident, un échangeur de chaleur plat installé sur une dalle de béton a été construit, sous le cœur. Bien que très vite, toute interaction corium-béton ait pu être écartée, cette action a été poursuivie jusqu'à son terme (fin juin) pour doubler les mesures de sécurité.

Le rapport soviétique sur l'accident est très bref sur cette opération qui, à l'époque, avait été largement commentée. Le tunnel, commencé à partir d'une tranchée près de l'unité 3, est à six mètres de profondeur. Sa longueur totale atteint 160 m avec un diamètre de 2 m. L'ouvrage fut achevé au début de juin.

Les injections de béton, qui avaient été annoncées plusieurs fois et qui pouvaient être interprétées comme un remplissage des locaux inférieurs du réacteur ne sont pas confirmées dans le rapport soviétique. Il est possible qu'elles correspondent à l'obturation de toutes les tuyauteries et liaisons diverses par où la radioactivité pouvait sortir du réacteur.

5.1.3. Le sarcophage du réacteur

Cette intervention est citée ici pour mémoire car elle est encore en cours. Il est envisagé de construire :

- un mur de protection externe tout autour du réacteur,
- une séparation en béton dans le hall des turbines entre les unités 3 et 4 et autour des auxiliaires du réacteur accidenté,
- une séparation métallique dans le hall des turbines entre les unités 3 et 2,
- un toit pour le hall des turbines.

Il est ensuite prévu de sceller toutes les communications avec le réacteur accidenté par du béton. Un système de ventilation, soit en circuit ouvert, soit en circuit fermé, sera mis en place.

5.2. L'EVACUATION DES POPULATIONS

Très vite, il est apparu nécessaire d'évacuer les populations :

- Dans un premier temps, dès le 26 avril au matin, les populations de la ville proche de **Pripyat** ont été invitées à minimiser le temps passé à l'extérieur et à vivre confinées chez elles avec les fenêtres fermées. Toutes les activités à l'extérieur ont été interdites pour les crèches, les jardins d'enfants et les écoles.
- Dans un second temps, le 27 avril au matin ou à partir de 14 heures, les habitants de cette ville, 45 000 (ou 49 000 à d'autres endroits du rapport), ont ainsi été évacués. L'opération a été terminée à 17 heures.
- Dans un troisième temps, les personnes vivant dans un rayon de 30 km autour de la centrale ont aussi fait l'objet d'une évacuation, peut-être seulement partielle.

Il semble que cette seconde évacuation ait eu lieu en plusieurs temps. Elle a d'abord concerné 84 000 personnes de la région même de **Tchernobyl** et **Pripyat** . D'après les informations reçues, elle aurait eu lieu vers le 6 mai. Par la suite, l'opération a encore conduit au déplacement de 40 000 autres Ukrainiens et Biélorussiens supplémentaires (et aussi de dizaines de milliers d'animaux !). Il a d'ailleurs été nécessaire, en particulier en Biélorussie, de permettre à certaines personnes évacuées de rentrer chez elles et d'en évacuer dans d'autres parties du territoire.

Au total, 135 000 personnes ont ainsi fait l'objet de l'évacuation. Mais il reste difficile de savoir si toutes les personnes qui vivaient dans un rayon de trente kilomètres autour de la centrale ont ou n'ont pas été évacuées. En outre, le rapport soviétique sur l'accident ne mentionne plus les 250 000 enfants de **Kiev** , ni les 60 000 enfants Biélorussiens de la région de **Gomel** qui ont été évacués pour l'été.

La longueur du calendrier d'évacuation, l'hétérogénéité des retombées, la différence de protection représentée par les immeubles urbains et les maisons rurales, peuvent expliquer que les doses reçues par les habitants de la ville de **Pripyat** soient environ dix fois inférieures à celles des résidents des villages situés à une même distance du réacteur accidenté.

5.3. LA RESTAURATION DES SOLS ET ESPACES CONTAMINES

La restauration du milieu contaminé par les retombées a conduit à plusieurs actions :

- A l'intérieur de l'usine, le réacteur n° 3 a été arrêté le 26 avril à 5 heures et les réacteurs n° 1 et 2, le 27 avril, respectivement, à 1 heure 13 et 2 heures 13. Cependant, une contamination importante des équipements et des bâtiments des unités 1 à 3 a fait suite à l'introduction d'eau contaminée par circulation dans le système de ventilation resté en marche après l'explosion. Une décontamination a donc été menée à bien avec des moyens variés et le niveau de radiation gamma avait baissé d'un facteur 10 à 15 au début du mois de juin. La comparaison des clichés pris par le satellite SPOT, les 1^{er} et 6 Mai, tend à montrer qu'entre ces deux dates, les soviétiques avaient vidés le petit bassin de pompage des réacteurs n° 3 et 4.
- A l'intérieur du site, l'ensemble des murs et des toits des bâtiments ont reçu des dépôts d'aérosols et de poussières radioactives.

Pour éviter leur remise en mouvement, le toit du bâtiment des turbines et les accotements des routes ont été recouverts de solutions polymérisées.

Le reste de la centrale a été divisée en zones distinctes. Pour chacune, en allant du "sale" vers le "propre", et en tenant compte des vents, différentes opérations ont été programmées :

- le matériel inutile et les équipements contaminés ont été enlevés,

- les toits et les surfaces des bâtiments ont été décontaminées,
- les sols ont été décapés sur une épaisseur de 5 cm à 10 cm et déposés dans les fouilles de l'unité cinq transformée en stockage de déchets,
- une dalle de béton ou des matériaux "propres" ont été, si nécessaire, étendus sur le sol et, par dessus, des pellicules de composés organiques ont été posés.

Au milieu du mois de mai, les décontamineurs couvraient, par jour, une surface de 300 000 mètres carrés avec ces films protecteurs.

– A l'extérieur du site de la centrale, la région, dans un rayon de trente kilomètres a été divisée en trois zones :

- une zone spéciale a été créée jusqu'à environ 4 km à 5 km, où l'entrée des personnels est strictement liée aux opérations de sécurité sur la centrale,
- une zone de 10 km dans laquelle des entrées limitées des habitants et des activités spécifiques peuvent être envisagées,
- une zone entre 10 km et 30 km où la population peut être réadmise et les activités rurales reprises sous une stricte surveillance radiologique.

Des contrôles ont été établis pour les personnes et les véhicules à la limite de chaque zone.

Naturellement, dans toutes ces zones, les niveaux de contamination sont mesurés régulièrement.

En parallèle avec la restauration des sols, une attention particulière est portée au réseau hydrographique. Il faut relever que, même si le courant n'est pas très rapide, la contamination s'est propagée assez vite, car la retenue de **Kiev**, près du point de prise d'eau de la ville, a vu une concentration maximale en iode 131, le 3 mai soit une semaine après l'accident.

5.4. LA PROTECTION DE LA NAPPE

Parmi les mesures prises autour du site, il convient de citer la construction, commencée dès le mois de juin, d'un complexe d'aménagements hydrauliques.

Ce complexe comporte entre autres :

- une enceinte étanche autour du site avec rabattement de la nappe à l'intérieur,
- un drainage pour le lac de refroidissement dont la forme et le fonctionnement ne sont pas précisés,
- un drainage isolant la rive droite de la rivière PRIPYAT,
- un drain formant une barrière d'interception dans le secteur sud-ouest des installations,
- une installation de purification des eaux drainées. Cet ensemble, apparemment très important, semble indiquer une pollution significative de la nappe sous le site.

L'installation d'une barrière de drainage "pour le lac de refroidissement" et pour protéger la rive droite de la rivière (commencée dès le 7 mai et intéressant plus de sept kilomètres) est, selon toute vraisemblance, liée aux retombées locales et se comprend aisément sans apporter d'informations sur l'état de la nappe si ce n'est souligner sa grande vulnérabilité. "D'après les dernières informations recueillies (octobre 1986), une zéolithe (silicate naturel) a été employée pour constituer une partie des ouvrages de protection et les Soviétiques envisageaient de traiter avec ce même minéral les boues du bassin de refroidissement où se sont concentrés les produits de fission ; les zéolithes agissant comme des tamis moléculaires sont, en effet, capables de fixer les radioéléments en quantités très importantes".

L'installation d'une barrière de drainage dite "d'interception" dans le secteur sud-ouest du site pourrait apporter quelques informations sur les écoulements souterrains. Mais deux hypothèses sont envisageables :

- les écoulements se feraient localement vers le Sud-Ouest ce qui indiquerait alors une alimentation de la nappe par le fleuve. Une telle situation pourrait être saisonnière et les directions varier en période d'étiage,
- les écoulements se feraient bien vers le Nord-Est, soit vers le fleuve, et cette barrière aurait simplement pour objet de limiter la contamination dans la partie la plus importante des retombées immédiatement après l'explosion.

Malheureusement, l'information est insuffisante pour tirer des conclusions plus précises puisqu'elle ne comporte ni la situation exacte (distance au site) ni la profondeur, ni l'orientation, ni la longueur de cette barrière.

°°

REFERENCES :

- (1) USSR STATE COMMITTEE ON THE UTILIZATION OF ATOMIC ENERGY.
The accident at the Tchernobyl Nuclear Power Plant and its consequences.
Information compiled for the AIEA Experts' Meeting, 22-26 august 1986, Vienna, 3 volumes (I : General Part, II, Annexes 1,3,4,5,6 et 2,7).
- (2) AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE ATOMIQUE (INSAG)
Summary Report on the Post-Accident Review Meeting On the Tchernobyl Accident. 30 august - 5 september 1986, Vienna, 1 volume.

6 : ESTIMATION DU TERME SOURCE

6.1. INVENTAIRE DU CŒUR DU RÉACTEUR EN PRODUITS DE FISSION ET ACTINIDES

Dans la précédente version du rapport IPSN, une évaluation grossière de l'inventaire du cœur avait été indiquée en se basant sur une analogie avec le cœur d'un REP, pour un taux de combustion de 11000 MWj/t, valeur la plus proche de celle estimée d'après le rapport isotopique Cs 137/Cs 134 observé dans les mesures effectuées en Europe.

Par la suite, une étude a été effectuée à partir des données connues sur la filière RBMK et d'un taux de combustion moyen de 8500 MWj/t, déduit des différents rapports isotopiques observés. Cette étude fournit un inventaire du cœur * sensiblement différent de celui estimé dans la précédente version du rapport IPSN.

Le rapport soviétique publié en août 1986 et le rapport INSAG (International Nuclear Safety Advisory Group) établi à partir de ce dernier par le comité d'experts de l'AIEA (réunis à Vienne en août 1986), permettent d'avoir des connaissances théoriquement plus précises sur le contenu du cœur (les activités sont présentées pour un refroidissement de 10 jours). Il faut cependant signaler une incohérence entre les activités du Pu 239 et du Np 239 (il semble que l'activité de ce dernier soit sous estimée d'un facteur 10), et une valeur anormalement élevée pour le Mobydène 99 (facteur 10).

Le tableau 6.1 présente, pour les isotopes les plus couramment observés en Europe, l'activité dans le cœur, pour un temps de refroidissement de 1 heure, obtenue par les trois méthodes précédemment citées (REP 11000 MWj/t, RBMK 8500 MWj/t étude CEA, RBMK rapport soviétique).

On peut noter que dans l'ensemble, la première estimation (REP) fournissait des activités un peu faibles, sauf en ce qui concerne le Neptunium 239 (surestimation apparente d'un facteur proche de 20).

Les estimations soviétiques sont assez cohérentes avec celles du CEA sauf pour les Cesium où les Soviétiques indiquent des valeurs environ deux fois supérieures.

Pour les deux principaux isotopes du Césium (134 et 137) les activités estimées par les Soviétiques sont environ 3 fois supérieures aux premières estimations (REP).

Dans la suite du rapport nous admettrons que l'inventaire correct du cœur est celui proposé par le CEA (tableau 6.1. - 3^e colonne).

6.2. EMISSION DE PRODUITS DE FISSION LORS DE L'ACCIDENT

Sur les dernières heures de fonctionnement, qui peuvent avoir une influence sur la puissance résiduelle et l'activité des produits de fission à vie courte (< 1 j), le rapport soviétique fournit les indications suivantes :

– le 25/04 à 1 h (heure locale = heure TU + 4) la puissance du réacteur est progressivement réduite jusqu'à 50 % de la puissance nominale (le 25/04 à 13 h) puis jusqu'à 200 MWth (soit 7 % de la puissance nominale) le 26/04 à 1 h et ceci jusqu'au moment de l'accident (26/04 à 1 h 23),

* Cet inventaire est en bon accord avec celui publié par l'Impérial Collège de Londres Report 087 juin 1986.

– les dernières vingt-quatre heures de fonctionnement à relativement faible puissance n'ont qu'une influence limitée sur la puissance résiduelle disponible au moment de l'accident et sur l'activité des produits de fission de période radioactive supérieure à 1 j, qui ont été les seuls observés, aussi bien en URSS que dans le reste de l'Europe. De plus les phénomènes dominants au début de l'accident semblent être une excursion de puissance et des explosions qui ont vraisemblablement libéré directement dans l'atmosphère des particules de combustible contenant les différents produits de fission dans les mêmes proportions que dans le cœur.

Les connaissances actuelles permettent de penser que dans une situation de fusion de cœur généralisée sans phénomène explosif, les produits de fission les plus volatils (gaz rares, iode, césium, tellure) sont émis en quasi-totalité par le cœur. Les produits de fission moins volatils, tels que le strontium ou le ruthénium, sont émis avec des taux de quelques pour mille ou pour cent de l'inventaire du cœur ; enfin, les lanthanides et les actinides sont émis avec des taux encore plus faibles, se chiffrant en 10^{-4} de l'inventaire du cœur. La figure 6.1 donne les cinétiques d'émission des produits de fission en fonction de la température, telles qu'elles ont été déduites d'un certain nombre d'expériences analytiques.

6.3. SITUATION MÉTÉOROLOGIQUE LES PREMIERS JOURS DE L'ACCIDENT

Les renseignements météorologiques et les cartes de trajectoires présentées ci-dessous ont été fournis par la Météorologie Nationale.

Les situations météorologiques pour les journées du 26/4 au 30/4 à 12 heures TU sont présentées sur les figures 6.2 à 6.6 qui comportent les cartes d'analyse en surface (voisinage du sol). Ces documents sont extraits des bulletins hebdomadaires d'études et de renseignements de la Météorologie Nationale ; ils mettent en évidence les zones de haute et basse pression ainsi que les limites des masses d'air (fronts).

Les données des radio-sondages de **Kiev** pour les mêmes journées à 0 h et 12 h TU sont portées sur le tableau 6.2.

On peut faire, sur la situation météorologique les premiers jours de l'accident, les commentaires suivants :

Le 26 avril, une zone de hautes pressions est située sur le nord-ouest de l'URSS, retenant un courant perturbé sur l'ouest de l'Europe, jusqu'en Scandinavie. Autour de **Tchernobyl**, on retrouve les caractéristiques d'une situation anticyclonique : vent au sol très faible avec forte inversion de température au sol et brouillard pendant la nuit, puis destruction de l'inversion après le lever du soleil.

Le radio-sondage de **Kiev** du 26/4 à 0 h TU montre une couche d'inversion au sol d'environ 250 mètres d'épaisseur, une nouvelle inversion à 2.000 mètres, le vent à 1.500 mètres étant d'E-S-E, avec une vitesse de 10 m.s^{-1} . A 12 heures TU, l'atmosphère est instable jusque vers 3.000 mètres, favorisant des échanges verticaux importants.

Au cours de la nuit suivante, le vent tourne à l'Est en faiblissant légèrement. L'inversion au sol est plus épaisse, de l'ordre de 500 mètres. La journée du 27 est analogue à celle du 26, avec toutefois une instabilité moins marquée. Des pluies à caractère orageux se sont produites sur la région de **Tchernobyl** durant ces 2 jours.

Les jours suivants, jusqu'au 1^{er} mai, la situation est marquée par la présence de deux minima d'altitude, l'un sur l'Islande, l'autre sur la Méditerranée occidentale, ce dernier entraînant une circulation d'Est sur nos pays. C'est pendant cette phase que les particules émises le 27 à **Tchernobyl** ont pu progresser vers l'Ouest. Dans le même temps, le vent au-dessus de **Tchernobyl** tourne au Nord-Ouest ; les éventuelles émissions résiduelles ne concerneront donc pas l'Europe de l'Ouest.

6.4. SURELEVATION DES REJETS

6.4.1. Présentation du problème

Les produits, rejetés durant plusieurs jours par la centrale, ont pu suivre différentes trajectoires en fonction de l'instant du rejet, mais aussi de l'altitude de départ. En effet, le panache, du fait de son énergie thermique initiale, s'est élevé à une altitude qui a varié au cours du rejet en fonction de la variation de la puissance disponible à la base et du changement des conditions météorologiques.

De plus, du fait de la forte diffusion verticale surtout pendant les heures d'ensoleillement, le panache présentait une extension verticale importante ; à l'extrême, il remplissait complètement la couche de mélange de l'atmosphère, située entre le sol et la base de l'inversion d'altitude s'élevant à 2 ou 3 km. Chaque tranche verticale du panache a pu suivre une trajectoire indépendante, en fonction du champ de vent à l'altitude correspondante. Ces champs de vent peuvent présenter des différences notables (tableau 6.2), qui se traduisent généralement par une rotation de la direction des vents et une accélération des vents avec l'altitude. Ce dernier aspect est important puisque les observations des instants d'arrivée du front de pollution, là où des mesures ont été effectuées (principalement dans les pays nordiques et ouest-européens), montrent que la vitesse de transport était comprise entre 8 et 10 ms⁻¹. Les radio-sondages de **Kiev** (tableau 6.2) montrent que les premiers jours de l'accident, il fallait s'élever à au moins 600 m pour atteindre une telle vitesse.

6.4.2. Résultats des calculs de surélévation

La surélévation initiale du rejet est liée à son énergie thermique à la source et aux conditions météorologiques locales.

L'énergie à la source peut-être estimée comme suit :

- la puissance résiduelle du réacteur est environ de 20 MW, correspondant à un temps de refroidissement de quelques heures pour un réacteur de 3.200 MWth ayant fonctionné à pleine puissance jusqu'à 24 h avant l'accident,
- l'oxydation des 150 t de zirconium des gaines et des tubes de force engendre la formation de 6,6 t d'hydrogène. La combustion de la moitié de cet hydrogène en 2 h dégage une puissance de 50 MW,
- le graphite, supposé brûler à raison de 20 t par jour, dégage 8 MW.

La puissance totale à la source était donc au maximum de 78 MW et au minimum de 28 MW après l'extinction du feu d'hydrogène.

Durant les premières heures de l'accident, tôt le matin du 26/4, le radio-sondage de **Kiev** de 0 h TU (tableau 6.2) montre la présence d'une inversion de température au sol (+ 1,3 °C/100 m) s'élevant jusqu'à 255 m et une atmosphère neutre au-delà, avec une nouvelle inversion à partir de 1.900 m.

Dans l'hypothèse de la puissance maximale, les calculs faits avec le code MICAR montrent que cette puissance était juste suffisante pour permettre au panache de traverser la couche d'inversion. Après sa traversée, cette couche d'inversion aurait joué le rôle de couvercle, en empêchant le panache de retomber au sol et protégeant ainsi les régions proches du site de la centrale.

Pour les heures suivantes de la journée du 26/4, après la disparition de l'inversion et alors que l'hydrogène était entièrement consommé, les calculs montrent qu'avec une puissance de 28 MW et en supposant une atmosphère neutre, le panache pouvait atteindre une altitude de 800 m. Avec l'instabilité se développant en cours de journée, ces mêmes calculs montrent une forte extension verticale du panache qui expliquerait la montée d'au moins une partie du panache jusqu'à 1.500 - 2.000 m.

Au cours des nuits suivantes (27 et 28/4), l'inversion au sol semble plus épaisse, bloquant le panache à environ 100 m d'altitude. Lorsque l'instabilité s'établit dans la journée, le même scénario que celui de la journée du 26/4 se serait reproduit.

Il apparaît donc que la surélévation du panache est un élément important puisqu'il explique non seulement le transport rapide des produits radioactifs par les courants d'altitude, mais aussi la relative protection dont auraient bénéficié les régions proches du site, au moins durant les premières heures de l'accident.

6.5. TRAJECTOIRES CALCULÉES

Pour le calcul des trajectoires elles-mêmes, se pose le problème du choix de l'altitude ; en effet, le vent (vitesse et direction) varie de façon importante avec l'altitude. En général dans les problèmes de transport de polluant, on calcule les trajectoires à deux niveaux au moins : l'un assez bas pour être toujours (ou presque) dans la couche de mélange, l'autre au-dessus. Devant la complexité de la situation pour **Tchernobyl**, nous avons choisi de faire le calcul à 4 niveaux de départ : 400, 800, 1.500 et 2.500 mètres. D'autre part un volume d'air donné ne reste pas toujours à la même altitude au cours de son déplacement. Plusieurs techniques existent pour surmonter cette difficulté ; pour notre part, nous avons calculé des trajectoires tridimensionnelles en prenant comme données d'entrée, outre les composantes U et V du vent, la composante verticale W du mouvement à l'échelle synoptique (quelques centaines de kilomètres). Le modèle utilisé, permet de prendre en compte des mouvements verticaux de l'écoulement liés aux structures d'assez grande échelle ; en revanche, les phénomènes d'échelle plus petite que la centaine de km (convection, structures de méso-échelle au voisinage des fronts,...) sont ignorés.

Les trajectoires ont été obtenues à partir des champs de vent établis au Centre Européen pour les Prévisions Météorologique à Moyen Terme (CEPMMT, dont la France est membre) aux niveaux de pression 1.000, 850, 700 et 500 hPa.

A titre d'illustration, pour les instants de départ du 26/4 à 6 h et 18 h et le 27/4 à 0 h et 12 h, la superposition des trajectoires correspondant aux 4 niveaux de calcul est présentée sur les figures 6.7 à 6.10. On observe des différences importantes entre les résultats. Ainsi, pour un départ le 26/4 à 6 h, on note que les trajectoires basses touchent l'Europe Occidentale alors que les trajectoires hautes atteignent l'Europe du Nord avant de retourner sur l'Union Soviétique.

D'après les comparaisons qui ont pu être faites entre les trajectoires calculées aux différentes altitudes de départ et les observations du niveau de radioactivité de l'air en Europe. Il semble que, dans l'ensemble, ce sont les trajectoires à 1.500 m qui apparaissent les plus satisfaisantes.

Les trajectoires calculées ne donnent que le trajet moyen des particules du centre du nuage. Ces particules diffusent transversalement, ce qui conduit à une largeur du panache fonction du temps de transfert. D'après le modèle IPSN, de dispersion atmosphérique, la largeur totale du panache est égale à 4,3 fois l'écart-type de diffusion transversal ; avec cette définition, les concentrations en limite de panache sont égales au dixième des concentrations sur l'axe : le tableau suivant présente, pour différentes durées de transfert, les largeurs calculées du panache.

Durée du transfert en jours	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Largeur du panache (en km)	170	340	520	690	860	1 000	1 170	1 300	1 430

Ainsi pour les pays nordiques, dans les journées des 27/4 et 28/4, le panache avait environ 300 km de largeur ; sur la France les 1 et 2 mai, il avait entre 700 et 900 km de largeur.

Pour le niveau de départ de 1500 m, les panaches correspondant aux rejets des 26, 27 et 29/04 sont présentés respectivement sur les figures 6.7, 6.8 et 6.9. On voit sur ces figures que les rejets du 26/04 ont rapidement atteint les pays nordiques (Suède, Finlande) ; que les rejets partant le 27/04 à 0 h ont touché l'Europe de l'Est, l'Allemagne, la France et l'Angleterre ; que ceux de 6 h et 12 h du même jour, ont atteint l'Europe de l'Est, le Nord de l'Italie, l'Est de la France, le Benelux et le Danemark ; à partir de 18 h la trajectoire se dirige vers la Grèce. Les trajectoires du 28/04, qui ne sont pas représentées, partent vers l'Est sur l'URSS, la Mer Noire, la Turquie et le Proche Orient (Syrie, Liban). Le 29/04 à partir de 6 h les trajectoires se dirigent vers le Sud-Est de l'Europe (Grèce, Sud de l'Italie).

En complément à ces trajectoires à 1500 m, sont présentées (figure 6.10) pour les départs du 26/04 à 6 h TU et 12 h TU, les trajectoires à 2500 m qui peuvent expliquer les observations faites en Finlande le 27/04 en fin de journée et la journée du 28/04.

6.6. MESURES DE RADIOACTIVITE EFFECTUEES EN EUROPE ET CONCORDANCE AVEC LES TRAJECTOIRES

Les trajectoires avec départ à 1.500 m ont été présentées au paragraphe précédent. Le tableau 6.3 ne fait que reprendre, pour chaque trajectoire supposée partir de **Tchernobyl** entre le 26/04 à 0 h et le 28/04 0 h, les pays ou zones géographiques successivement traversés.

On dispose, au moins pour l'Europe du Nord et l'Europe occidentale, d'indications assez précises des dates et lieux où un accroissement très sensible de la radioactivité a été noté. La bonne concordance ou une concordance approximative (en général décalage inférieur à un jour) sont également notées sur ce tableau.

Les mesures faites en Suède, Allemagne, Suisse, France, Grande Bretagne et dans une moindre mesure celles de Hollande et du Danemark, coïncident à peu près avec les dates et lieux du passage des trajectoires (rejets des 26 et 27/04). Les trajectoires du 27/04 à 18 h TU et des journées des 29 et 30/04 expliquent de façon satisfaisante les mesures faites en Grèce au début du mois de mai. Par contre les trajectoires correspondant aux rejets du 26/04 à 18 h et du 28/04 (toute la journée) qui se dirigeaient vers l'Est de l'URSS, ne peuvent être actuellement recoupées avec aucune mesure.

6.7. COEFFICIENTS DE TRANSFERT ATMOSPHERIQUE A LONGUE DISTANCE

Les produits radioactifs relâchés hors du réacteur lors de l'accident sont transportés par le vent qui règne à l'altitude où se trouvent ces produits, ce qui définit la trajectoire du panache. Autour de cette trajectoire du centre de masse des produits radioactifs, qui se trouvent sous forme de particules, de gaz ou de vapeurs, les produits diffusent dans les trois axes (de propagation, transversal et vertical) et peuvent également disparaître du panache par la décroissance radioactive, le dépôt sec au contact du sol et surtout le lavage par les précipitations.

Les coefficients de transfert atmosphérique (CTA, exprimé en $s.m^{-3}$) permettent, pour une condition météorologique donnée (stabilité atmosphérique, vitesse du vent...) et un appauvrissement défini, de calculer, à partir de l'activité rejetée (Q en Bq) l'activité volumique intégrée (AVI en $Bq.s.m^{-3}$) en un point situé à une certaine distance (ou mieux à un certain temps de transfert) du point de rejet :

$$AVI (Bq.s.m^{-3}) = Q(Bq) \times CTA (s.m^{-3})$$

Cette AVI est, expérimentalement, l'intégrale des mesures de concentration en fonction du temps et il semble plus correct d'utiliser cette grandeur, qui intègre la totalité du passage du panache, que d'autres grandeurs telles que des valeurs moyennes ou des valeurs obtenues sur des temps limités.

De plus cette activité volumique intégrée permet de calculer rapidement les doses intégrées (exposition externe et interne) lors du passage du panache.

Pour pouvoir passer des concentrations mesurées en différents points d'Europe aux rejets initiaux associés, il faut se fixer des valeurs de CTA correspondant aux conditions de la dispersion atmosphérique. Les valeurs suivantes ont été retenues en tenant compte de l'appauvrissement par dépôt sec, mais non par la pluie (difficile à évaluer précisément) :

à 1.000 km : $2,2 \cdot 10^{-10}$ s.m⁻³, avec une incertitude d'un facteur 2
à 2.000 km : $5 \cdot 10^{-11}$ s.m⁻³, avec une incertitude d'un facteur 4
à 3.000 km : $2 \cdot 10^{-11}$ s.m⁻³, avec une incertitude d'un facteur 4

6.8. EVALUATION DU REJET DURANT LES DEUX PREMIERS JOURS

Dans un souci de simplification le rejet total sur les deux premiers jours a été divisé en 8 rejets partant toutes les 6 h, chacune des phases du rejet suivant alors une trajectoire différente établie en fonction des conditions météorologiques (Figures 6.11 à 6.14).

Il existe une sélection * représentative des résultats de mesures d'activités volumiques intégrées (AVI) pour l'iode 131 et le césium 137 et l'appartenance supposée de chacune de ces mesures à une trajectoire.

Les deux isotopes précédemment cités ont été choisis parce qu'ils sont les mieux mesurés (ou publiés de façon plus complète) parmi la vingtaine d'isotopes identifiés, qui appartiennent aux principales familles de fission (PF), depuis l'iode jusqu'aux actinides en passant par le césium, le ruthénium, le zircornium, le cérium.

Au niveau des mesures transmises pour l'iode, il existe une imprécision quant aux formes d'iode effectivement mesurées. Les Instituts qui ont fait des mesures complètes, en plaçant successivement un filtre à particules (à fibres de verre) et un charbon actif imprégné, ont noté que l'iode particulaire ne constituait que de l'ordre de 15 à 20 % de l'iode total en Scandinavie et environ 60 % en Hollande.

Le comportement physico-chimique des radioéléments intervient bien entendu au niveau de l'émission hors du combustible mais également lors du transfert dans l'installation (ou ce qu'il en reste), lors du transfert atmosphérique, en particulier dans les phénomènes de dépôts sec et de lavage par la pluie et enfin lors de la mesure.

Le comportement de l'iode est particulièrement complexe, ce qui était déjà connu et qui est nettement confirmé dans cet accident. Le rapport isotopique Cs 137/Cs 134 est, dans l'ensemble des mesures, pratiquement constant et égal à 1,9 ce qui implique un taux de combustion de l'ordre de 8.500 MWj/t.

Si l'on examine les trajectoires et les mesures correspondantes, on peut en déduire les évaluations suivantes du rejet, en se basant dans un premier temps, sur le Cs 137.

- la trajectoire "finlandaise", pouvant être expliquée par un rejet à environ 2.500 m le 26/04, correspond à un rejet de l'ordre de 1 % du contenu du cœur en Cs 137.
- les trajectoires suédoises (rejet le 26/04 sauf certainement les toutes premières heures du rejet) correspondent à un rejet de l'ordre de 2 % du cœur.

* En particulier n'ont pas été retenus certains résultats singuliers qui paraissent incohérent avec les autres résultats ; la vérification des mesures par les différents Instituts concernés est en cours.

– la trajectoire passant par l'Europe Centrale (départ le 27/04 à 0 h) avec des points de mesure en Allemagne (Bavière), France (surtout région parisienne) et Grande Bretagne (Sud) correspond à une fraction rejetée moyenne de 4 % ;

– les trajectoires passant par l'Europe Centrale et le Golfe de Gènes (départ le 27/04 à 6 h et 12 h TU), avec des points de mesure en Allemagne (Bavière) dans l'Italie du Nord, dans l'Est de la France, en Hollande et au Danemark correspondent à une fraction rejetée moyenne de 4,5 % ;

– on ne dispose que d'informations très partielles et non directement utilisables sur les trajectoires partant le 26/04 à 18 h (passage en Pologne observé le 27/04 en fin de journée) et sur les trajectoires parties après le 27/04 à 18 h.

Au total, pour les trajectoires "interprétables", correspondant à une partie des rejets des journées du 26 et 27 avril, la fraction estimée du cœur rejetée en Cs 137, représentatif de l'ensemble des césiums, peut être comprise entre 4 et 40 %. L'incertitude est grande, due à la fois à la dispersion du petit nombre de mesures exploitables et au transfert atmosphérique sur de très longues distances (avec les problèmes de répartitions verticale et transversale dans le panache et surtout d'appauvrissement par le lavage par la pluie sur certaines parties des trajectoires et même au moment des mesures). Une estimation moyenne et raisonnable de rejet en Cs sur les deux premiers jours pourrait être de l'ordre de 12 % du cœur, avec un facteur d'incertitude de 3, en plus ou en moins.

Pour l'iode, quand la mesure de l'iode **total** a été faite, on trouve une fraction du cœur sensiblement égale à celle du Césium.

6.8.1. Comparaison des activités surfaciques calculées et mesurées.

La relation entre les activités volumiques intégrées (AVI) et les activités surfaciques (AS) résultant du dépôt sec s'écrit :

$$AS(Bq.m^2) = AVI(Bq.s.m^{-3}) \times V_d(m.s^{-1})$$

V_d est la vitesse de dépôt sec, qui s'expriment en $m.s^{-1}$ et dont la valeur peut varier de 1.10^{-3} (fines particules) à 1.10^{-2} (grosses particules ou iode moléculaire).

En prenant une vitesse moyenne de dépôt **sec** de $3.10^{-3} m.s^{-1}$, le passage des AVI du tableau 6.2 aux AS donne les résultats suivants, qui peuvent être comparés aux valeurs mesurées :

Lieu	Activité surfacique (kBq. m ⁻²)			
	I 131		Cs 137	
	Calculée	Mesurée	Calculée	Mesurée
Finlande - Helsinki	22	15-37	0,75	2,5-5
Suède - Studvisk	20	10-80	2,4	0,5-2
France - Orsay	1,7	0,6	0,9	0,15
France - Verdun	2,4	ND	1,4	ND
G.B. (moyenne)	1,8	0,5-2,7	0,3	0,03-0,7
RFA - Bavière/Moyenne	5,1	20-34 (P)	2,7	10 (P)
Hollande - Bilthoven	4,2	0,6-4 (H)	0,6	0,1-0,9 (H)
Danemark - RisØ	0,4	0,2-1 (H)	0,1	0,003 (H)

ND : Non disponible

(P) : Pluie lors du passage du panache

(H) : dépôt sur l'herbe (environ 1/3 du dépôt total).

On peut constater que l'accord entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées est assez bon, si l'on excepte les lieux où il a, de façon sûre, plu assez fortement lors du passage du panache.

Par ailleurs, à partir des valeurs moyennes d'activité surfacique en Europe, on peut estimer que la quantité totale, déposée représente déjà 2 % de l'activité du cœur en iode et césium. Cette méthode, assez grossière, conduit à une valeur minimale puisqu'elle ne prend pas en compte les dépôts en URSS et POLOGNE, les dépôts importants dûs à la pluie et la fraction qui est restée en suspension après avoir traversé l'Europe.

6.8.2. Estimation des rejets pour les autres familles de produits de fission (PF).

En plus de l'iode et du césium, des isotopes représentatifs de la plupart des grandes familles de produits de fission ont été identifiés et mesurés. En supposant que tous ces isotopes se comportent de la même façon, lors des transferts et des dépôts en particulier, on peut estimer les taux * d'émission, en relatif par rapport à celui du césium :

Pour les tellures (en se basant sur Te 132) : de l'ordre de 1 (identique au Cs).

Pour les ruthéniums et rhodiums (en se basant sur Ru 106 et Rh a06) : entre 1/20 et 1/10.

Pour les lanthanides (en se basant sur Ce 141 ou La 140) : entre 1/1.000 et 1/100.

Pour les actinides (en se basant sur quelques mesures en Np 239) de l'ordre de 1/1.000 (à partir d'une activité du cœur de 410^{19} Bq à 1 h de refroidissement).

Pour avoir les taux d'émission de ces familles de PF, il faut multiplier les valeurs relatives données ci-dessus par la valeur absolue de la fraction rejetée en césium soit de l'ordre de 12 %. On obtient ainsi des ordres de grandeur des fractions rejetées des autres familles de produits de fission (pour les deux premiers jours de rejet et d'après les mesures en Europe occidentale) :

Tellure 12 %
Ruthénium 0,6 à 1,2 %
Lanthanides 0,01 à 0,1 %
Actinides 0,01 %

Pour les gaz rares on ne dispose pratiquement **d'aucune** mesure d'activité mais on peut supposer que leur quasi-totalité a été rejetée hors du réacteur.

6.9 SYNTHÈSE DES DONNÉES TRANSMISES PAR LES SOVIÉTIQUES EN AOUT 1986 (AIEA) ET DU RAPPORT INSAG.

6.9.1. Terme-source

Il est difficile de savoir sur quelles données principales se sont appuyés les Soviétiques, pour fournir en particulier une cinétique de rejet. Apparemment des mesures ont été faites dans l'air, au-dessus du site, avec des appareils embarqués sur des hélicoptères.

Les Soviétiques distinguent 4 phases dans le rejet principal qui a duré 9 jours :

* Mis à part Np 239 et Zr 95, qui apparaissent en proportion plus importante en Scandinavie qu'en Europe Occidentale, ces taux relatifs ne semblent pas dépendre des trajectoires, tout au moins pour les deux premiers jours du rejet.

Phase 1 – Suite à l'explosion, dispersion mécanique de combustible légèrement "enrichi" en I, Cs, Te ; le rejet est estimé à $8,1 \cdot 10^{17}$ Bq ($2,2 \cdot 10^7$ Ci) ** globaux, sans détail par isotope ou groupe d'isotopes.

Phase 2 – Du 27/4 au 1/5 décroissance des rejets due à la diminution du feu de graphite et à l'effet de filtration des matériaux déversés : rejet de $8,1 \cdot 10^{17}$ Bq ($2,2 \cdot 10^7$ Ci).

La composition des rejets serait proche de celle du combustible et les PF auraient été entraînée par les gaz chauds du graphite.

Phase 3 – Du 2/5 au 5/5 la température du cœur s'échauffe au-delà de 2.000° C, des réactions se produisent entre l' UO_2 et le graphite, des aérosols de PF se fixent sur des particules de graphite.

Le rejet correspondant est de $1,0 \cdot 10^{18}$ Bq ($2,7 \cdot 10^7$ Ci).

Phase 4 – Au delà du 5/5, diminution rapide de l'émission des PF suite aux contre-mesures prises, à la diminution de la puissance résiduelle et à la formation de composés moins volatils entre le PF et certains matériaux : rejet estimé à $3,7 \cdot 10^{15}$ Bq ($1 \cdot 10^5$ Ci).

Au total, pour l'ensemble des quatre phases précédemment décrites, les pourcentages de l'inventaire cœur (tableau 6.1) rejetés hors du réacteur sont estimés à :

- environ 100 % pour les gaz rares,
- entre 10 à 20 % pour les I, Cs et Te,
- entre 3 à 6 % pour les autres produits de fission, les actinides et le combustible.

Le rejet total sur les 9 premiers jours (du 26/4 au 4/5) est estimé à $2,5 \cdot 10^{18}$ Bq ($7 \cdot 10^7$ Ci) pour les produits volatils et les terres rares, auxquels il faut ajouter environ 10^8 Ci de gaz rares. Pour le combustible, les Soviétiques estiment que 2 à 2,5 % se sont déposés à moins de 20 km du réacteur.

Les aérosols mesurés étaient de taille très variable de 1 à quelque dizaines de microns. Ils peuvent avoir été produits par des processus de vaporisation ou des processus mécaniques ; dans les deux cas ils sont généralement "enrichis" en espèces volatiles par rapport au combustible dans le cœur.

6.9.2. Mesure dans l'environnement.

Le rapport Soviétique fournit un assez grand nombre de mesures faites à moins de 100 km du réacteur, mais souvent assez longtemps après le début de l'accident et en des lieux non précisés. De plus, compte tenu des conditions météorologiques complexes durant les 9 jours de rejets principaux, il est difficile d'associer les résultats de ces mesures avec une ou plusieurs phases du rejets.

A proximité (1 km) du réacteur les activités volumiques totales dans l'air ont été les suivantes :

- le 26/4 : 10^7 Bq/m³ ; isotopes dominants Te 132 et I 132
- le 5/5 (fin des rejets internes) : $3 \cdot 10^5$ Bq/m³ ; isotopes dominants : I 131, La 140, Ce 140, Ru 103, Te 132, I 132
- le 9/5 : $2 \cdot 10^5$ Bq/m³ ; isotopes dominants I 131 (environ 60.000 Bq/m³), Ru 103, Te 132, T_C 99, La 140
- le 5/6 $4,5 \cdot 10^2$ Bq/m³.

** Les activités annoncées par les Soviétiques (ramenées au 6/05/86) ont été corrigées de façon à avoir les activités réelles rejetées chaque jour.

Sur le sol, le 8/5, l'activité totale est de l'ordre 10^7 Bq/g de sol, les isotopes dominants (Zr95, Ce 141, Ba 140, Ce 144) ayant une activité comprise entre 2 et $3 \cdot 10^6$ Bq/g. Curieusement les césiums n'apparaissent pas

- le 17/5, à l'intérieur de la zone de 30 km, le sol a une activité surfacique totale de $1,2 \cdot 10^8$ Bq/m² ; les isotopes dominants sont toujours Zr 95, Ce 141, Ru 103 mais également I 131 ($2 \cdot 10^7$ Bq/m²), Cs 137 et 134 ($1 \cdot 10^7$ Bq/m² soit 270 μ Ci/m²) – A **KIEV** (130 km) le 2/5, l'activité surfacique était de $3,8 \cdot 10^5$ Bq/m² en I 131 et de $1,1 \cdot 10^4$ Bq/m² (0,32 μ Ci/m²) en Cs 137.

Les mesures de l'air et du sol ont tendance à montrer que pratiquement tous les produits de fission, y compris ceux réputés les moins volatils, ont été rejetés avec des taux d'émission peu différents (facteur 5).

6.9.3. Débit de dose, et doses à proximité du site

A **Pripyat** (3 km du site), tard dans la nuit du 26/4 le débit de dose a commencé à croître, atteignant 10 mSv/h (1rem/h) le 27/4.

Un mois après le début de l'accident le débit de dose atteint encore 1 mSv/h (0,1 rem/h) jusqu'à 10-15 km mais dans certaines directions seulement ; l'isodose 10^{-2} mSv/h passant généralement entre 20 et 40 km du site.

La dose collective des 135.000 personnes évacuées dans un rayon de 30 km est estimée à $1,6 \cdot 10^4$ homme-Sv. Pour Pripyat la dose externe moyenne est de l'ordre de 0,03 Sv (3 rem) ; dans les couronnes suivantes, entre 3 et 30 km, la dose moyenne (estimée d'après la dose collective) varie entre 0,5 et 0,05 Sv, suivant la distance et certainement la cinétique d'évacuation.

6.9.4. Elévation du rejet et trajectoires

Les soviétiques précisent que le 27/4, au N-O, à 30 km, le panache était à 1.200 m de haut, dans les jours suivants les rejets s'élevaient entre 200 et 400 m.

Il est difficile de suivre les trajectoires tracées, mais les directions de départ s'accordent assez bien avec celles de l'IPSN (calculées par la Météorologie Nationale), à altitude égale. Les soviétiques ont apparemment calculé plusieurs altitudes de départ jusqu'à 1.500 m. Il est difficile de savoir s'il ont effectué des mesures de suivi en altitude du nuage.

°°

TABLEAU 6-1
INVENTAIRE DU CŒUR POUR UN TEMPS DE REFROIDISSEMENT DE 1 H
ACTIVITÉS EN CURIES

	1 ^{ere} Estimation CEA d'après REP : 11 000 MWj/t	2 ^{eme} Estimation CEA cœur RBMK 8 500 MWj/t *	Rapport Soviétique cœur RBMK **	Estimation de l'activité rejetée ***	Activité totale rejetée par famille
Kr 85 Xe 131m 133m 133	2.9.10 ⁵ 5.0.10 ⁵ 2.2.10 ⁷ 1.6.10 ⁸	8.2.10 ⁵ 4.3.10 ⁵ 2.8.10 ⁶ 1.0.10 ⁸	8.9.10 ⁵ 1.7.10 ⁸	8.2.10 ⁵ 4.3.10 ⁵ 2.8.10 ⁶ 1.0.10 ⁸	Gaz rares taux d'émission 100 % 1.0.10⁸ Ci
I 131	7.1.10 ⁷	4.2.10 ⁷	8.3.10 ⁷	8.4.10 ⁶	Iodes taux d'émission 20 % 8.4.10⁶ Ci
Cs 134 136 137	1.6.10 ⁶ 1.3.10 ⁶ 2.5.10 ⁶	2.2.10 ⁶ 1.2.10 ⁶ 4.8.10 ⁶	5.1.10 ⁶ 7.8.10 ⁶	3.3.10 ⁵ 1.8.10 ⁵ 7.2.10 ⁵	Césium taux d'émission 15 % 1.2.10⁶ Ci
Te 127m 129m 131m 132	6.2.10 ⁵ 5.2.10 ⁶ 6.4.10 ⁶ 1.0.10 ⁸	6.7.10 ⁵ 3.2.10 ⁶ 5.9.10 ⁶ 5.9.10 ⁷	 7.3.10 ⁷	1.0.10 ⁵ 4.8.10 ⁵ 8.8.10 ⁵ 8.8.10 ⁶	Tellures Taux d'émission 15 % 1.0.10⁷ Ci
Sr 89 90 Mo 99 Ba 140 Ru 103 Ru 106 Rh 105	8.8.10 ⁷ 2.2.10 ⁶ 1.4.10 ⁸ 1.4.10 ⁸ 9.9.10 ⁷ 1.25.10 ⁷ 5.1.10 ⁷	6.1.10 ⁷ 3.5.10 ⁶ 8.0.10 ⁷ 7.8.10 ⁷ 6.8.10 ⁷ 2.5.10 ⁷ 3.3.10 ⁷	6.2.10 ⁷ 5.4.10 ⁶ 1.5.10 ⁹ 1.3.10 ⁸ 1.3.10 ⁸ 5.4.10 ⁷	2.4.10 ⁶ 1.4.10 ⁵ 5.6.10 ⁶ 3.1.10 ⁶ 2.7.10 ⁶ 1.0.10 ⁶ 1.3.10 ⁶	Sr, Ba, Ru, Rh Taux d'émission 4 % 1.6.10⁷ Ci
La 140 Ce 141 143 144 Pr 143	1.4.10 ⁸ 1.3.10 ⁸ 1.2.10 ⁸ 5.9.10 ⁷ 1.3.10 ⁸	7.9.10 ⁷ 8.3.10 ⁷ 7.0.10 ⁷ 7.9.10 ⁷ 7.2.10 ⁷	 1.5.10 ⁸ 8.6.10 ⁷	2.4.10 ⁶ 2.5.10 ⁶ 2.1.10 ⁶ 2.4.10 ⁶ 2.2.10 ⁶	La, Ce, Pr Taux d'émission 3 % 1.2.10⁷ Ci
Nd 147 Zr 95	5.2.10 ⁷ 1.3.10 ⁸	2.9.10 ⁷ 1.0.10 ⁸	1.3.10 ⁸	8.7.10 ⁵ 3.0.10 ⁶	Divers Taux d'émission 3 % 3.9.10⁶ Ci
Activité Pu 238 239 240 242 Am 241 Cm 242 244 Activité β Pu 241 Np 239	 1.7.10 ⁴ 1.7.10 ⁴ 1.1.10 ⁴ 7.85 6.6.10 ² 8.1.10 ⁴ 3.4.10 ² 2.0.10 ⁶ 1.10 ⁹	 Activité des actinides non évaluée	 2.7.10 ⁴ 2.3.10 ⁴ 3.2.10 ⁴ 7.0.10 ⁵ 4.6.10 ⁶ 7.3.10 ⁷	 8.1.10 ² 6.9.10 ² 9.6.10 ² 2.1.10 ⁴ 1.4.10 ⁵ 2.2.10 ⁶	Actinides Taux d'émission 3 % Activité 2.3.10⁴ Ci Activité β 2.3.10⁶ Ci

Activité totale
rejetée **1.58.10⁸ Ci**
dont **1.0.10⁸ Ci**
de G.R.

* Valeur moyenne déduite des rapports isotopiques observés en Europe Occidentale ;
cette valeur est en assez bon accord avec les 10 000 MWj/t annoncés par les Soviétiques.

** Les activités fournies par les soviétiques sont corrigées pour être ramenées à un temps de refroidissement de 1 h.

*** Cette estimation est basée sur les taux d'émission retenus par les soviétiques et les activités du cœur fournies par l'étude du C.E.A. sauf en ce qui concerne les actinides, pour ces derniers les activités retenues sont celles fournies par les soviétiques.

TABLEAU 6-2

DONNÉES DES RADIOSONDAGES DE KIEV DU 26/04 A 0 HEURE TU AU 30/04 A 12 HEURES TU
(Celui du 29/04 à 0 heure est manquant)

26/04 0 HEURE TU

KIEV : Latitude : 50.40 N Longitude : 30.45 E Nuages : 00901 Qualité : B
Altitude de la couche limite : 421.M Inversion : base 166.M / sommet 421.M

ALTITUDE M	PRESSION HPA	TEMPERATURE DEG C	POINT DE ROSEE DEG C	HUMIDITE %	DIRECTION DEG	VITESSE M/S
166.	1000.	10.8	5.8	71.	225.	3.
421.	970.	12.8	6.8	67.	184.	3.
627.	946.	11.3	5.0	65.	150.	3.
1935.	807.	1.8	– 6.2	55.	111.	12.
2158.	785.	1.2	– 6.8	55.	104.	14.
2300.	771.	.2	– 7.7	55.	100.	15.
2895.	715.	– 3.8	– 11.8	54.	110.	15.
3338.	676.	– 6.8	– 14.7	53.	95.	14.
3503.	662.	– 7.9	– 15.9	53.	95.	14.
5610.	500.	– 23.9	– 30.9	52.	95.	16.

26/04 12 HEURES TU

KIEV : Latitude : 50.40 N Longitude : 30.45 E Nuages : 835// Qualité : B
Altitude de la couche limite : 3291.M Inversion : base 9999.M / sommet 9999.M

ALTITUDE M	PRESSION HPA	TEMPERATURE DEG C	POINT DE ROSEE DEG C	HUMIDITE %	DIRECTION DEG	VITESSE M/S
166.	998.	19.2	5.2	40.	360.	6.
535.	955.	15.8	3.6	44.	5.	5.
802.	925.	13.4	2.3	47.	75.	8.
1660.	835.	5.6	– 2.4	56.	71.	8.
2770.	727.	– 3.1	– 5.1	86.	65.	9.
3073.	700.	– 5.5	– 6.3	94.	75.	10.
4391.	589.	– 13.8	– 16.5	80.	120.	16.

27/04 0 HEURE TU

KIEV : Latitude : 50.40 N Longitude : 30.45 E Nuages : 8043/ Qualité : B
Altitude de la couche limite : 679.M Inversion : base 169.M / sommet 679.M

ALTITUDE M	PRESSION HPA	TEMPERATURE DEG C	POINT DE ROSEE DEG C	HUMIDITE %	DIRECTION DEG	VITESSE M/S
169.	996.	10.8	9.4	91.	0.	0.
373.	972.	10.8	8.6	86.	165.	7.
679.	937.	10.8	7.4	79.	148.	7.
1005.	901.	9.0	4.4	73.	129.	7.
1948.	802.	1.0	– .6	89.	75.	8.
2101.	787.	– .3	– 1.5	92.	83.	9.
2506.	748.	– 2.5	– 3.2	95.	105.	10.
2656.	734.	– 3.3	– 3.8	96.	103.	10.
3887.	625.	– 11.5	– 13.6	85.	85.	10.
5106.	533.	– 19.7	– 23.3	73.	90.	10.
5403.	512.	– 22.1	– 29.1	53.	93.	11.
5580.	500.	– 23.3	– 31.3	48.	95.	11.

TABLEAU 6-2 (suite)

27/04 12 HEURES TU

KIEV : Latitude : 50.40 N Longitude : 30.45 E Nuages : 65500/ Qualité : B
 Altitude de la couche limite : 996.M Inversion : base 9999.M / sommet 9999.M

ALTITUDE M	PRESSION HPA	TEMPERATURE DEG C	POINT DE ROSEE DEG C	HUMIDITE %	DIRECTION DEG	VITESSE M/S
159.	995.	14.0	9.0	72.	0.	0.
356.	972.	13.2	7.2	67.	245.	4.
548.	950.	12.4	5.4	62.	187.	4.
770.	925.	10.8	3.8	62.	120.	3.
870.	914.	10.2	3.1	62.	145.	4.
1063.	893.	8.8	1.8	61.	139.	5.
1326.	865.	6.6	1.6	70.	131.	7.
1760.	820.	2.6	– 1.2	76.	118.	10.
1868.	809.	1.9	– 1.5	78.	115.	11.
2799.	720.	– 4.1	– 4.8	95.	115.	11.
3790.	633.	– 10.9	– 14.7	73.	115.	12.
4596.	570.	– 16.3	– 23.3	55.	97.	11.
5560.	500.	– 23.1	– 25.5	81.	75.	9.

28/04 0 HEURE TU

KIEV : Latitude : 50.40 N Longitude : 30.45 E Nuages : 00900/ Qualité : B
 Altitude de la couche limite : 475.M Inversion : base 9999.M / sommet 9999.M

ALTITUDE M	PRESSION HPA	TEMPERATURE DEG C	POINT DE ROSEE DEG C	HUMIDITE %	DIRECTION DEG	VITESSE M/S
173.	993.	9.0	7.7	92.	0.	0.
707.	931.	8.4	3.9	73.	240.	2.
805.	920.	7.8	3.0	72.	218.	2.
840.	916.	7.6	2.9	72.	210.	2.
1047.	893.	6.1	2.1	76.	225.	2.
1505.	844.	3.0	.4	83.	147.	3.
1601.	834.	2.4	.1	85.	130.	3.
1797.	814.	1.4	– 2.5	75.	147.	4.
2157.	778.	– 1.0	– 5.7	70.	180.	5.
2697.	727.	– 4.5	– 10.5	63.	143.	4.
3165.	685.	– 5.9	– 14.9	49.	110.	4.
3596.	648.	– 9.9	– 18.9	48.	79.	3.
3726.	637.	– 10.7	– 19.8	47.	70.	3.
4600.	568.	– 15.7	– 25.7	42.	75.	6.
4896.	546.	– 18.1	– 28.1	41.	76.	7.
5540.	500.	– 23.5	– 29.5	58.	80.	9.

28/04 12 HEURES TU

KIEV : Latitude : 50.40 N Longitude : 30.45 E Nuages : 41501/ Qualité B
 Altitude de la couche limite : 2119.M Inversion : base 9999.M / sommet 9999.M

ALTITUDE M	PRESSION HPA	TEMPERATURE DEG C	POINT DE ROSEE DEG C	HUMIDITE %	DIRECTION DEG	VITESSE M/S
166.	992.	17.0	5.0	45.	225.	3.
703.	931.	12.8	3.8	54.	229.	4.
819.	918.	11.6	3.5	58.	230.	4.
1215.	875.	7.6	2.2	69.	230.	6.
1434.	852.	5.3	1.2	75.	245.	4.
1561.	839.	4.0	.6	78.	250.	4.
1936.	801.	1.2	– 3.7	70.	265.	4.
2358.	760.	.4	– 8.6	51.	268.	5.
2496.	747.	.2	– 7.8	55.	269.	6.

TABLEAU 6-2 (suite)

29/04 12 HEURES TU

KIEV : Latitude : 50.40 N Longitude : 30.45 E Nuages : 21500/ Qualité : B
 Altitude de la couche limite : 2823.M Inversion : base 3576.M / sommet 3893.M

ALTITUDE M	PRESSION HPA	TEMPERATURE DEG C	POINT DE ROSEE DEG C	HUMIDITE %	DIRECTION DEG	VITESSE M/S
164.	992.	20.8	8.8	46.	0.	0.
611.	941.	16.7	8.1	57.	295.	2.
1305.	867.	10.3	5.7	73.	290.	3.
1384.	859.	9.6	5.4	75.	283.	3.
1596.	837.	7.7	3.6	75.	265.	3.
2121.	785.	3.0	– 1.0	75.	265.	5.
2183.	779.	2.7	– 1.4	74.	265.	5.
2961.	707.	– 1.7	– 6.7	69.	292.	4.
3456.	664.	– 5.6	– 11.3	64.	310.	3.
3576.	654.	– 6.5	– 12.5	62.	309.	3.
3893.	628.	– 6.5	– 21.5	29.	307.	4.
3993.	620.	– 6.9	– 22.9	27.	306.	4.
5192.	530.	– 17.1	– 32.1	26.	298.	6.
5630.	500.	– 20.1	– 35.1	25.	295.	7.

30/04 0 HEURE TU

KIEV : Latitude : 50.40 N Longitude : 30.45 E Nuages : 00900/ Qualité : B
 Altitude de la couche limite : 411.M Inversion : base 159.M / sommet 411.M

ALTITUDE M	PRESSION HPA	TEMPERATURE DEG C	POINT DE ROSEE DEG C	HUMIDITE %	DIRECTION DEG	VITESSE M/S
159.	994.	15.0	8.0	63.	0.	0.
411.	965.	17.0	8.0	55.	319.	4.
497.	955.	16.3	7.3	55.	305.	5.
759.	925.	14.3	5.3	53.	295.	1.
1377.	858.	9.5	.5	53.	25.	3.
2203.	776.	3.1	– 5.9	52.	355.	3.
2404.	749.	.9	– 8.1	51.	315.	2.
2934.	710.	– 2.5	– 11.5	50.	307.	2.
3270.	680.	– 4.3	– 14.4	45.	300.	2.
4547.	577.	– 11.1	– 27.1	25.	1.	4.
5630.	500.	– 19.7	– 35.7	23.	55.	5.

30/04 12 HEURES TU

KIEV : Latitude : 50.40 N Longitude : 30.45 E Nuages : 00900/ Qualité : B
 Altitude de la couche limite : 2578.M Inversion : base 9999.M / sommet 9999.M

ALTITUDE M	PRESSION HPA	TEMPERATURE DEG C	POINT DE ROSEE DEG C	HUMIDITE %	DIRECTION DEG	VITESSE M/S
166.	994.	23.0	7.0	36.	0.	0.
894.	911.	17.1	3.6	41.	350.	2.
1126.	886.	15.3	2.5	42.	60.	3.
2021.	796.	8.1	– 2.2	48.	75.	6.
2999.	708.	.2	– 7.8	55.	15.	2.
3828.	638.	– 6.1	– 20.1	32.	39.	2.
4658.	573.	– 12.5	– 27.5	27.	64.	2.
5179.	535.	– 15.1	– 31.1	24.	80.	2.
5690.	500.	– 18.7	– 34.7	23.	60.	3.

Départ 1500m, 1 trajectoire chaque 6h, tous temps T.U. (GMT), points de passage du centre des trajectoires

27/04	28/04	29/04	30/04	1/05	2/05

OBSERVATIONS

Lettonie (URSS) Colfe de Botnie N-E Suède N-E Suède Nord Finlande N-O URSS

Lithuanie (URSS) Stockholm N-E Suède N-E Suède Centre Finlande N-O URSS

Lithuanie-NE Pologne Stockholm N-E Suède N-E Suède Centre Finlande Lac Ladoga URSS

N-E Pologne Gotland (Suède) Estonie (URSS) Bielorussie Ukraine Ukraine

Lithuanie N-Pologne N-O Bavière Suisse Paris Côte Angletterre Ecosse
Tchécosl. Alsace Normande

O-Ukraine S-E Pologne Tchécoslovaquie Venise-Trieste Alpes-France Alsace
Autriche-hongrie

O-Ukraine S-E Pologne Tchécoslov. N-Italie Golfe de Gènes Lyon Luxembourg
Hongrie

Ukraine Ukraine Ukraine Mer d'Azov Mer Noire Grèce

Est Kiev → Est URSS

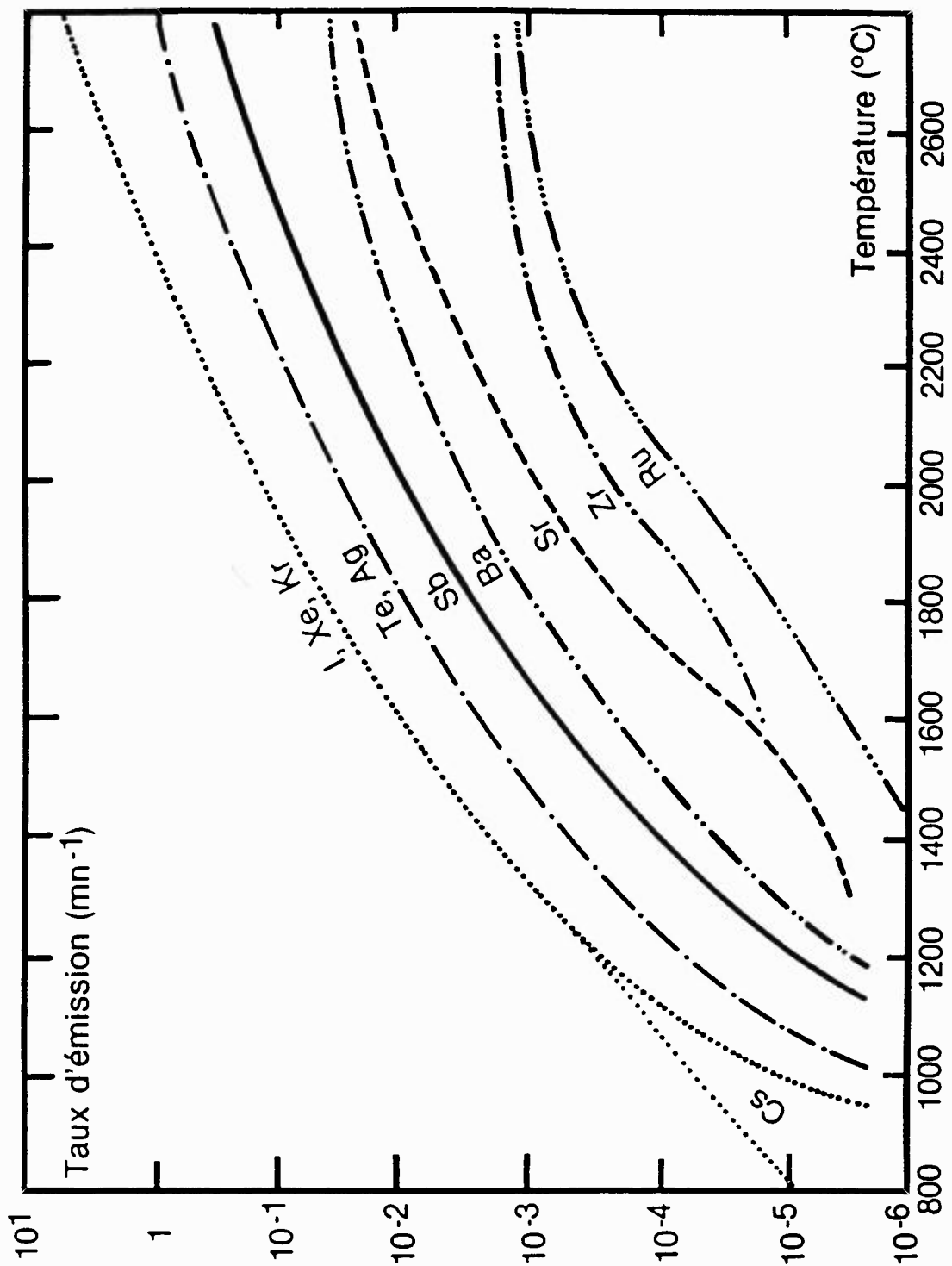
— bon accord avec les observations
- - - accord moyen avec les observations

26/04

REJET

27/04

TABLEAU 6-3

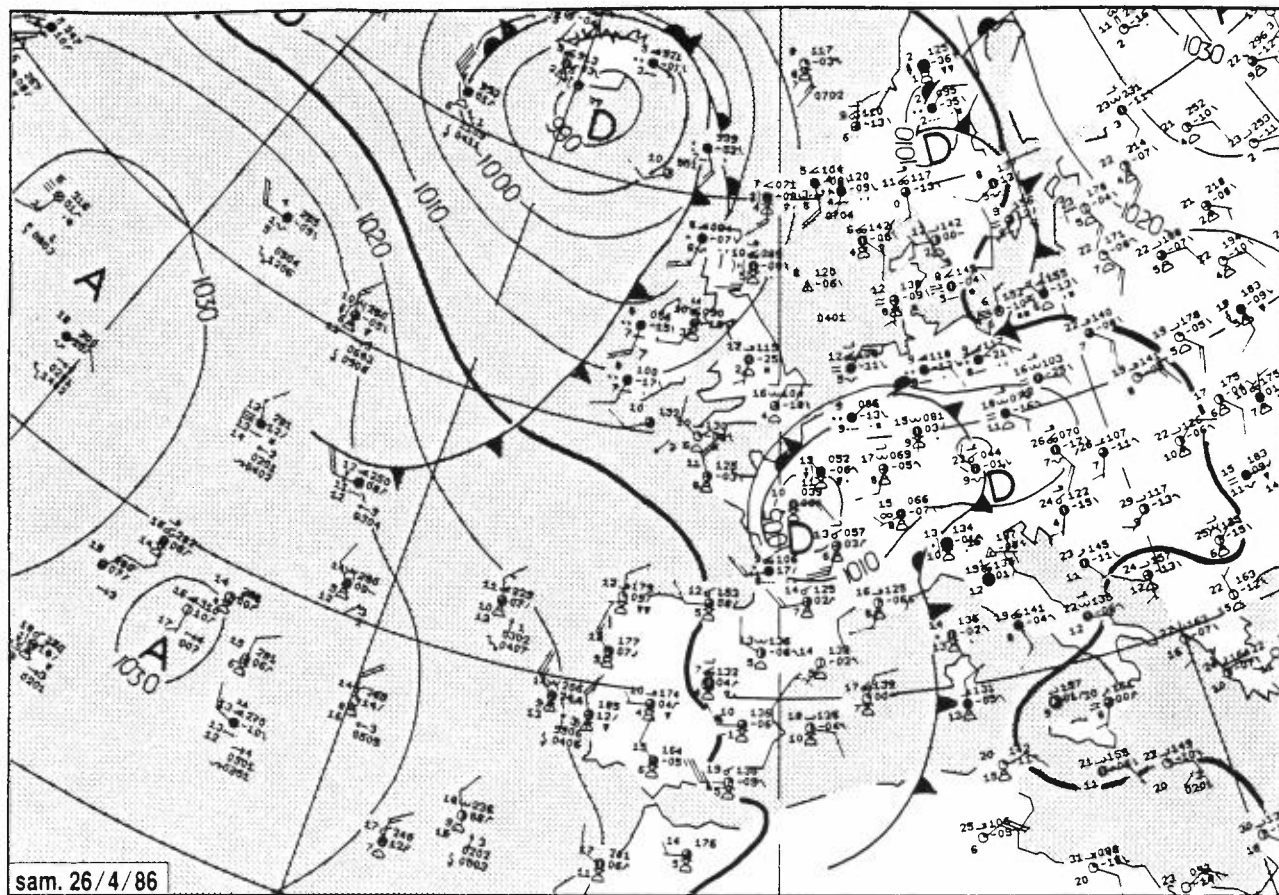


CINETIQUE D'EMISSION DES PRODUITS DE FISSION

FIGURE 6-1

Samedi 12 h TU

ANALYSE EN SURFACE



SURFACE 500 hPa

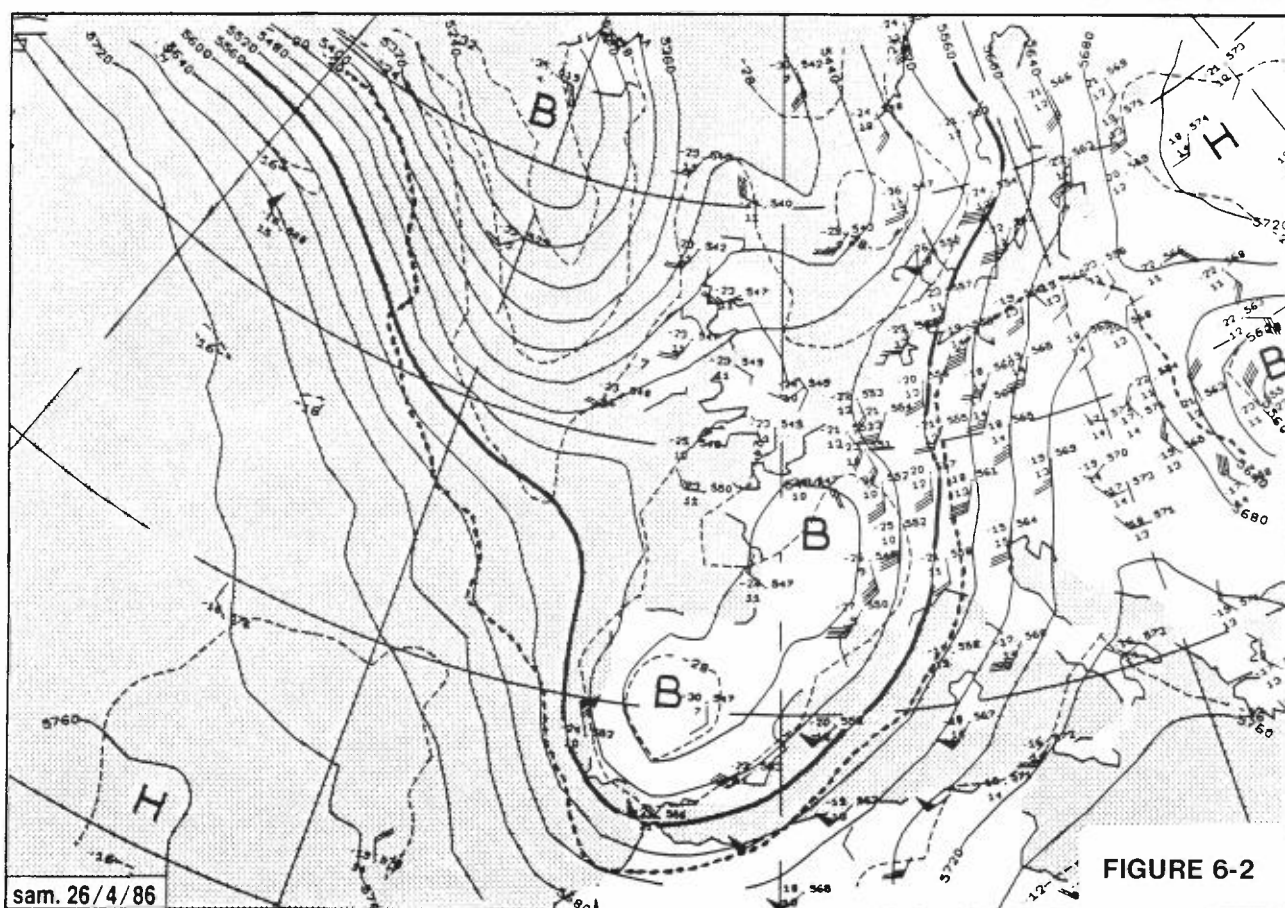
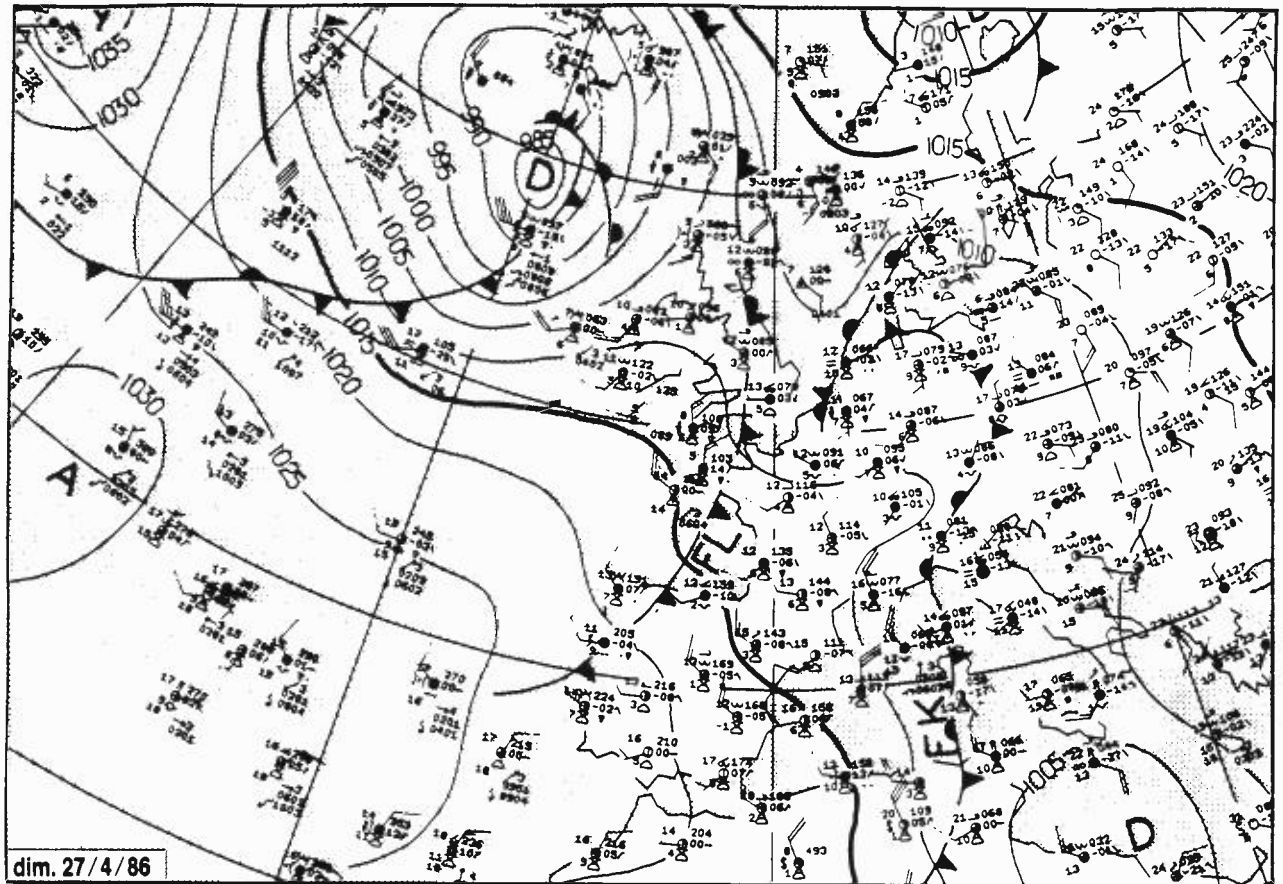
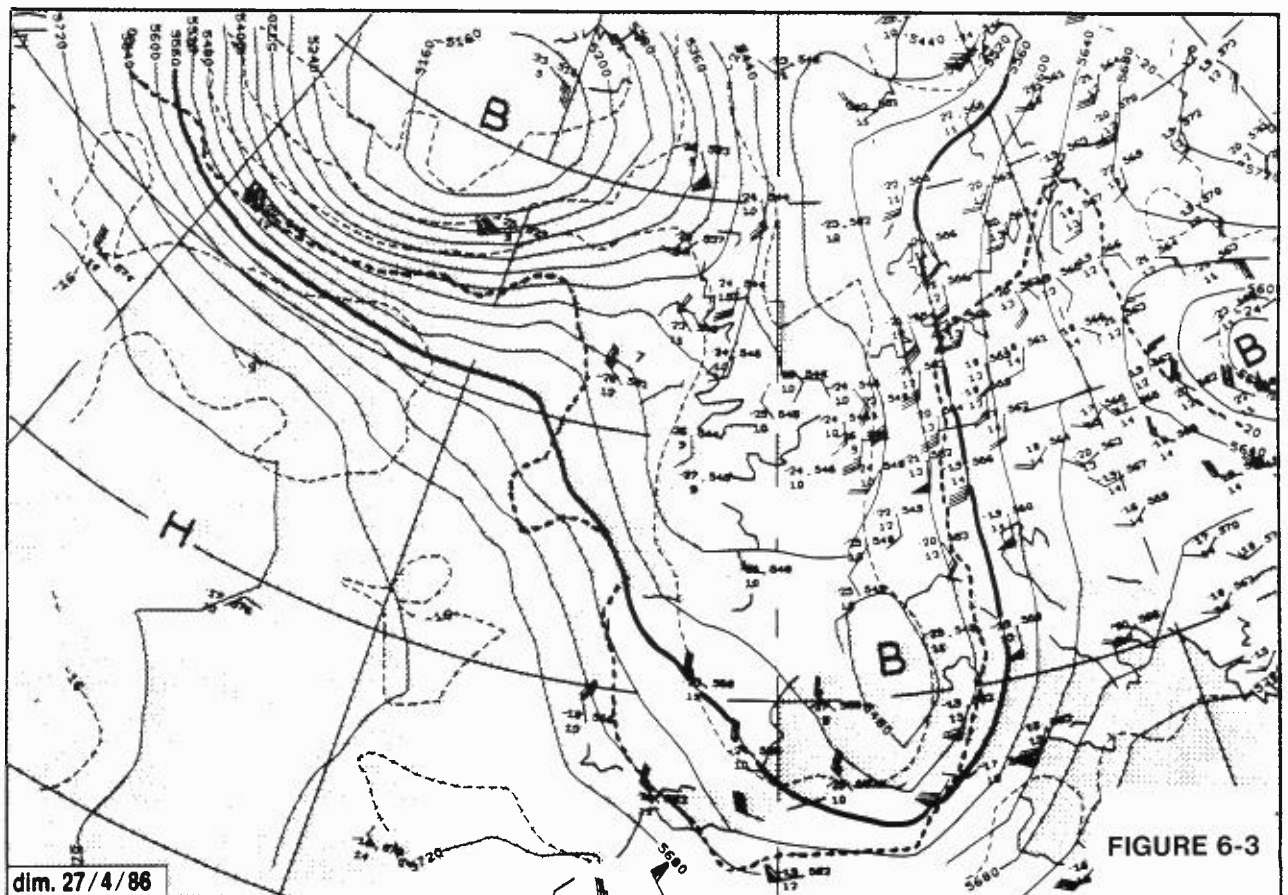


FIGURE 6-2

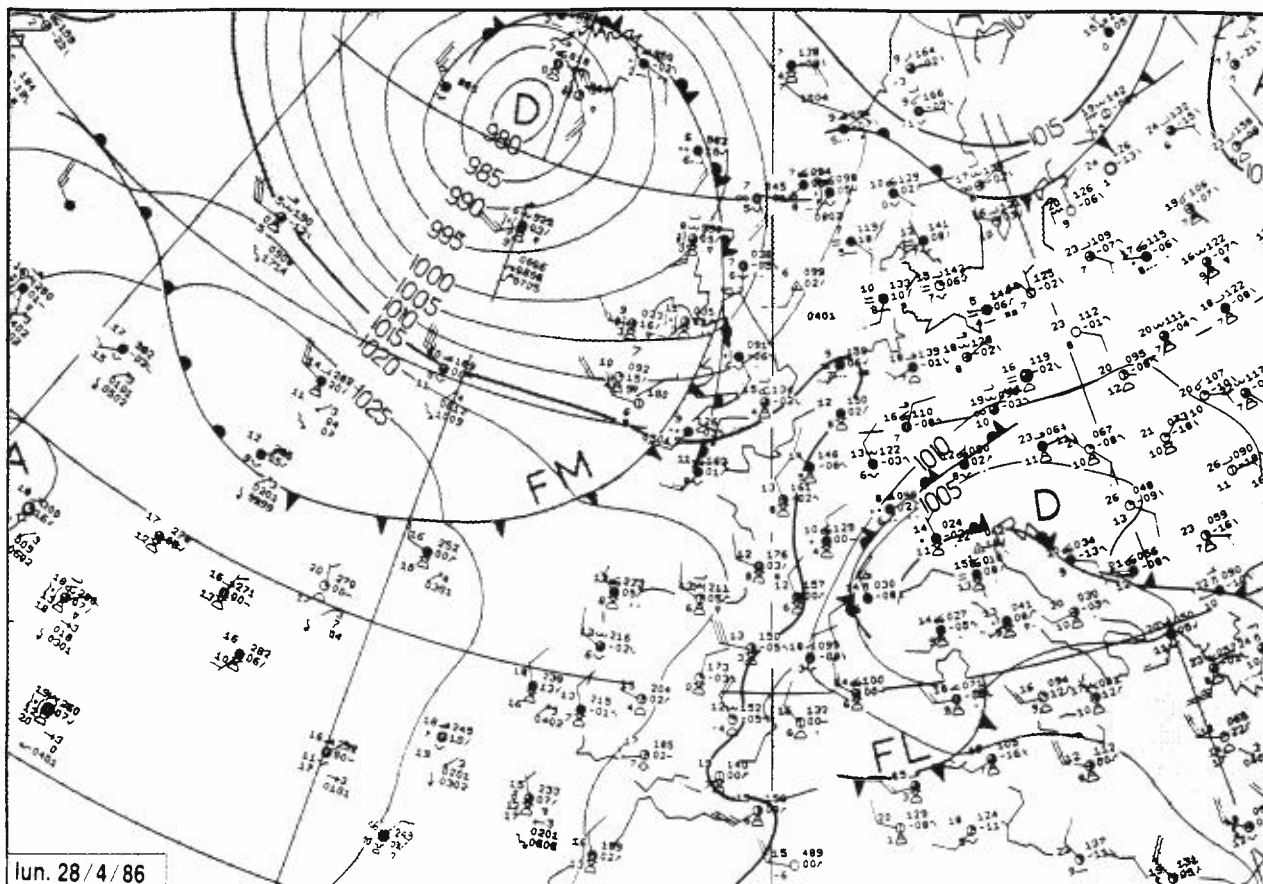


SURFACE 500 hPa



Lundi 12 h TU

ANALYSE EN SURFACE



SURFACE 500 hPa

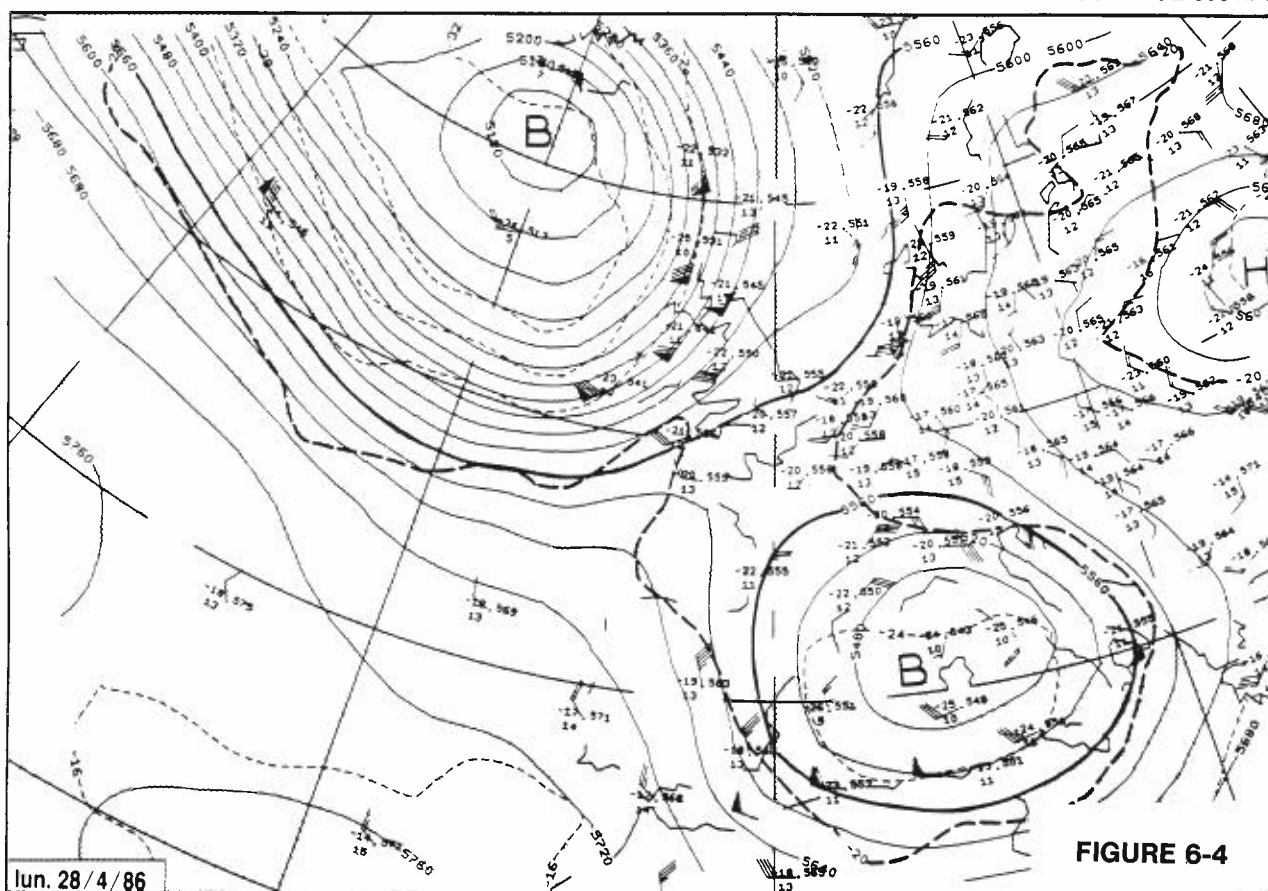
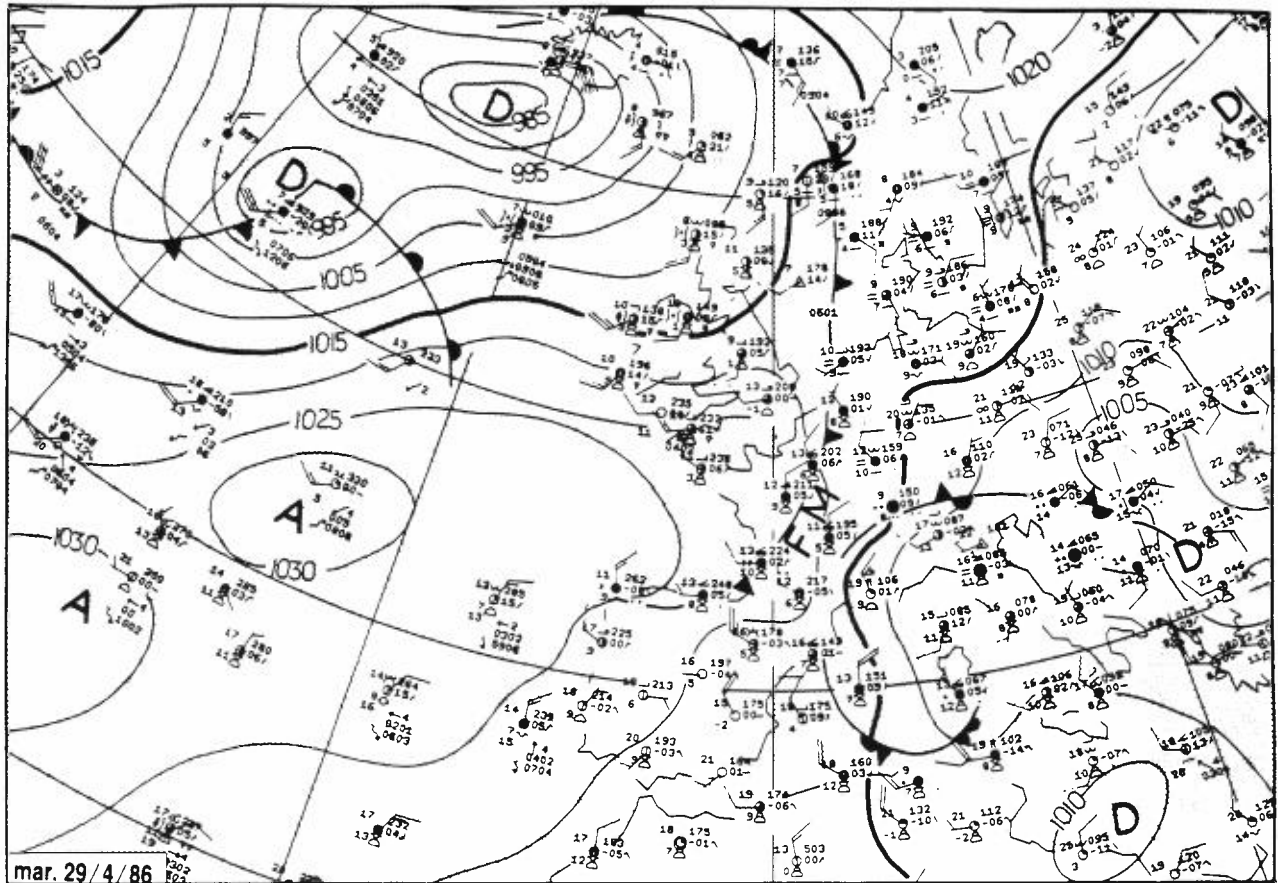


FIGURE 6-4

Mardi 12 h TU

ANALYSE EN SURFACE



SURFACE 500 hPa

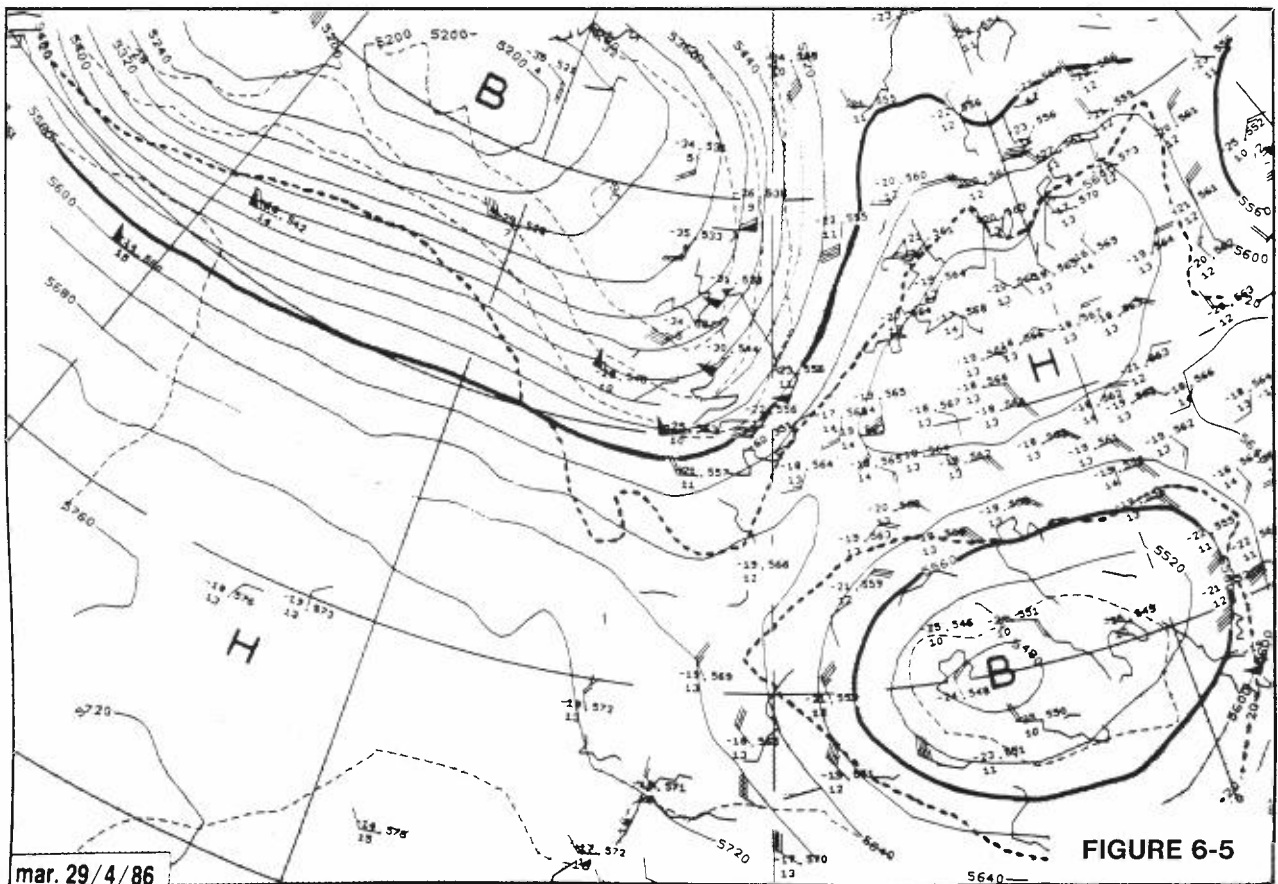
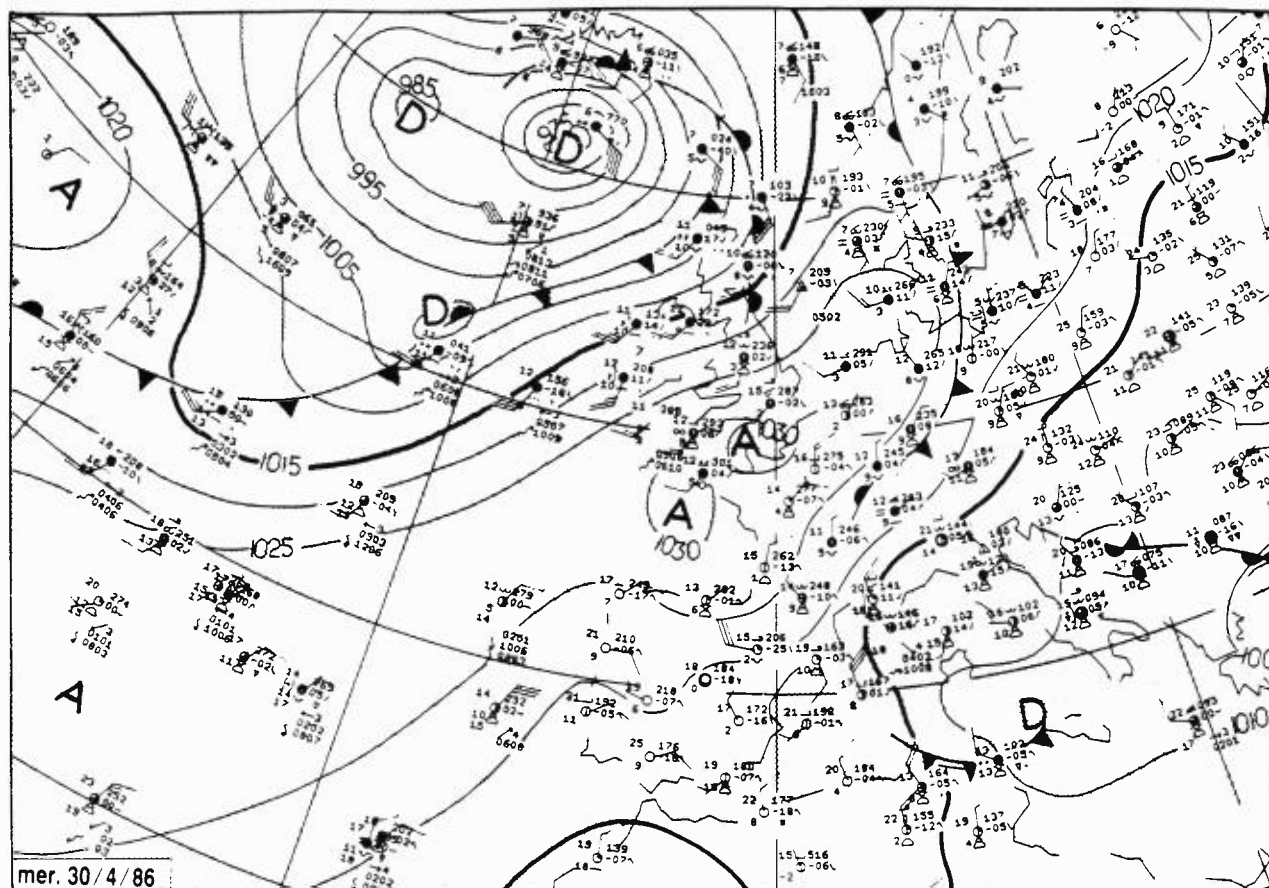


FIGURE 6-5

Mercredi 12 h TU

ANALYSE EN SURFACE



SURFACE 500 hPa

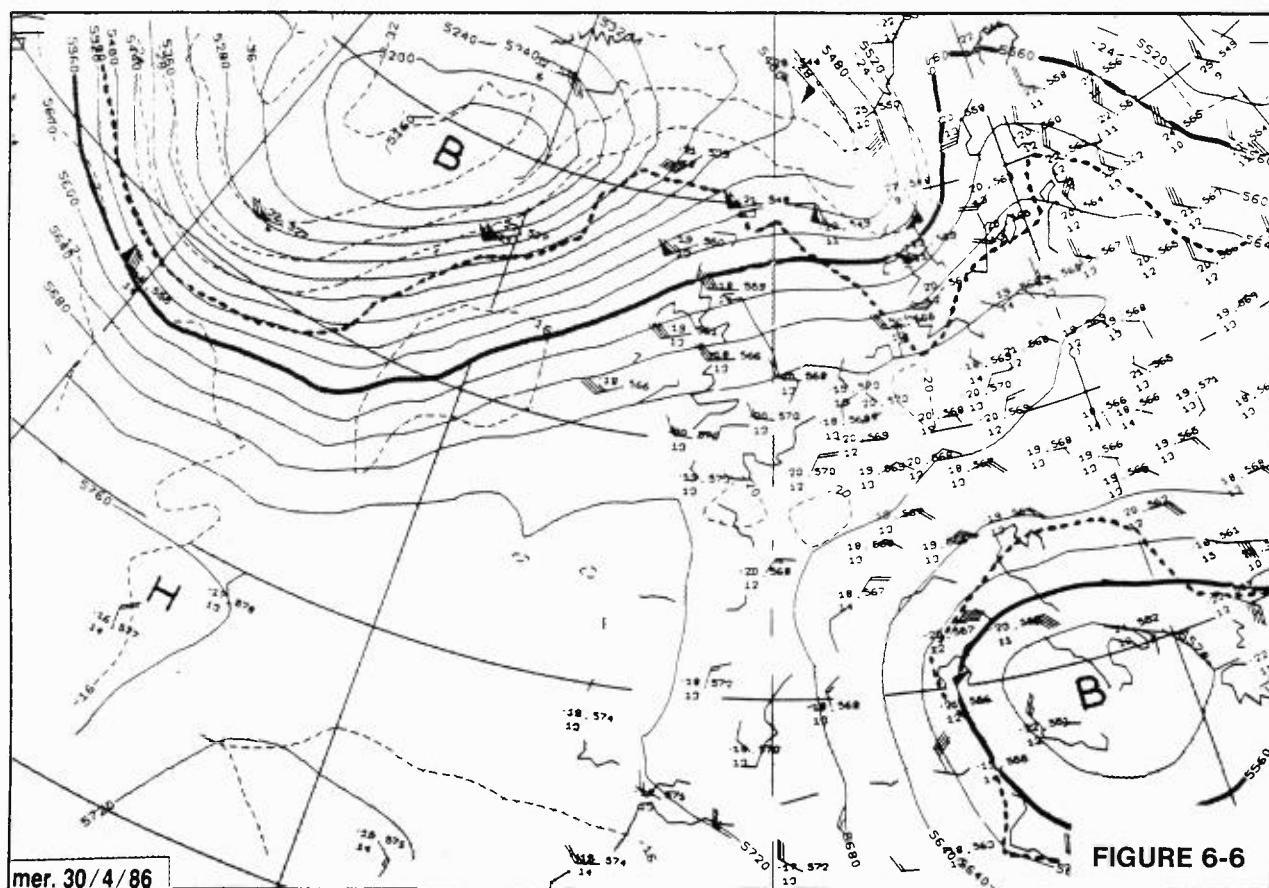


FIGURE 6-6

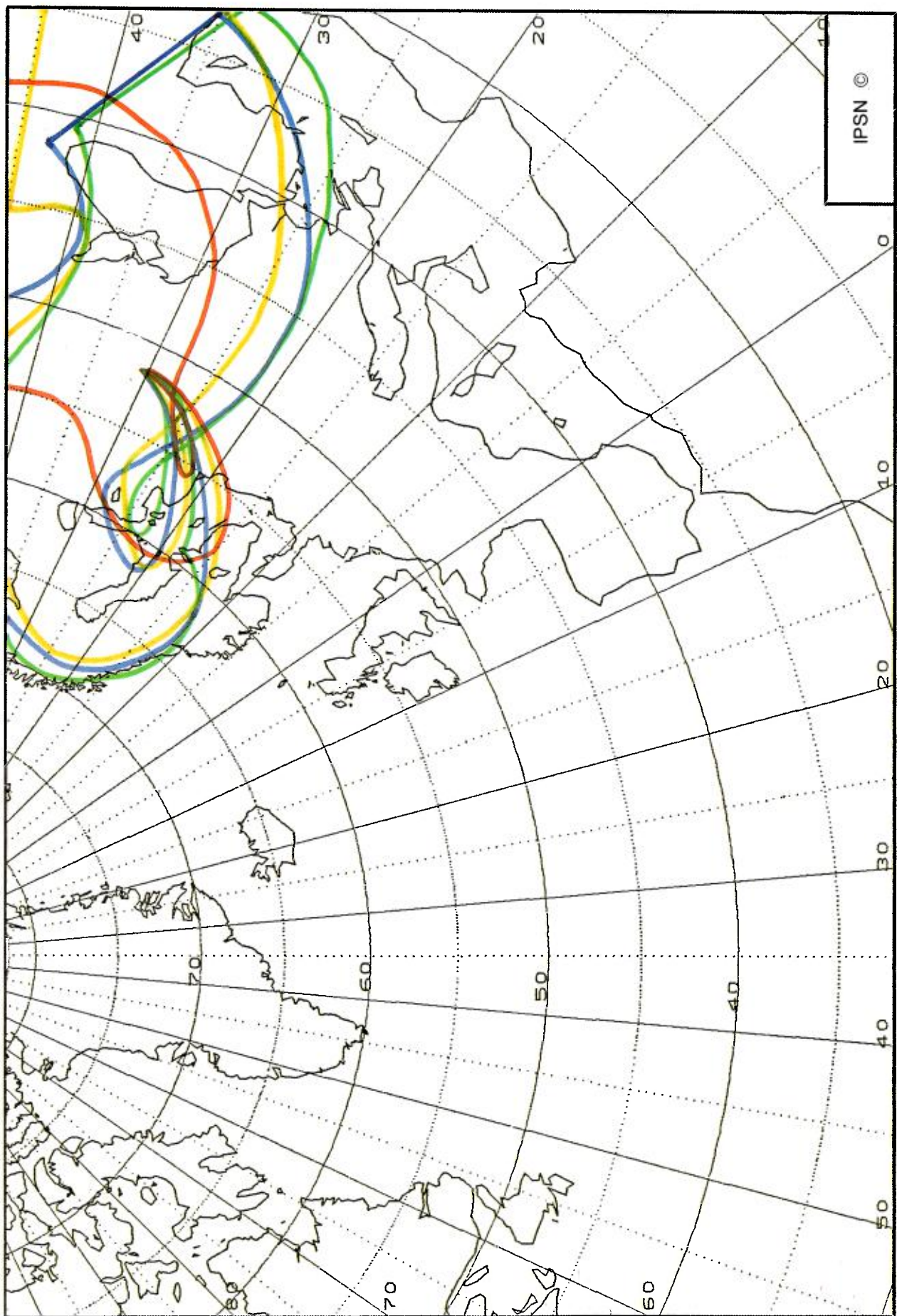


FIGURE 6-7

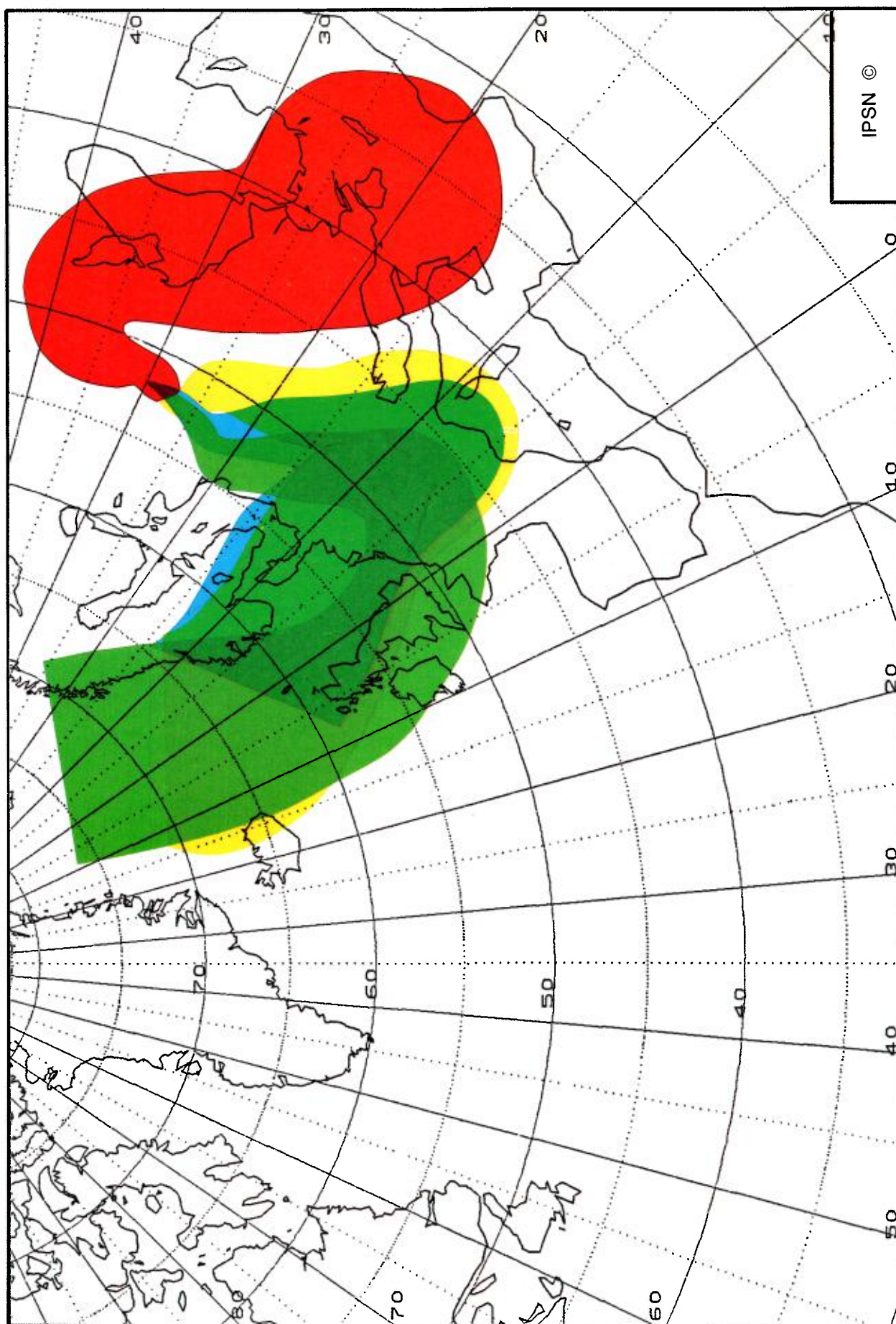
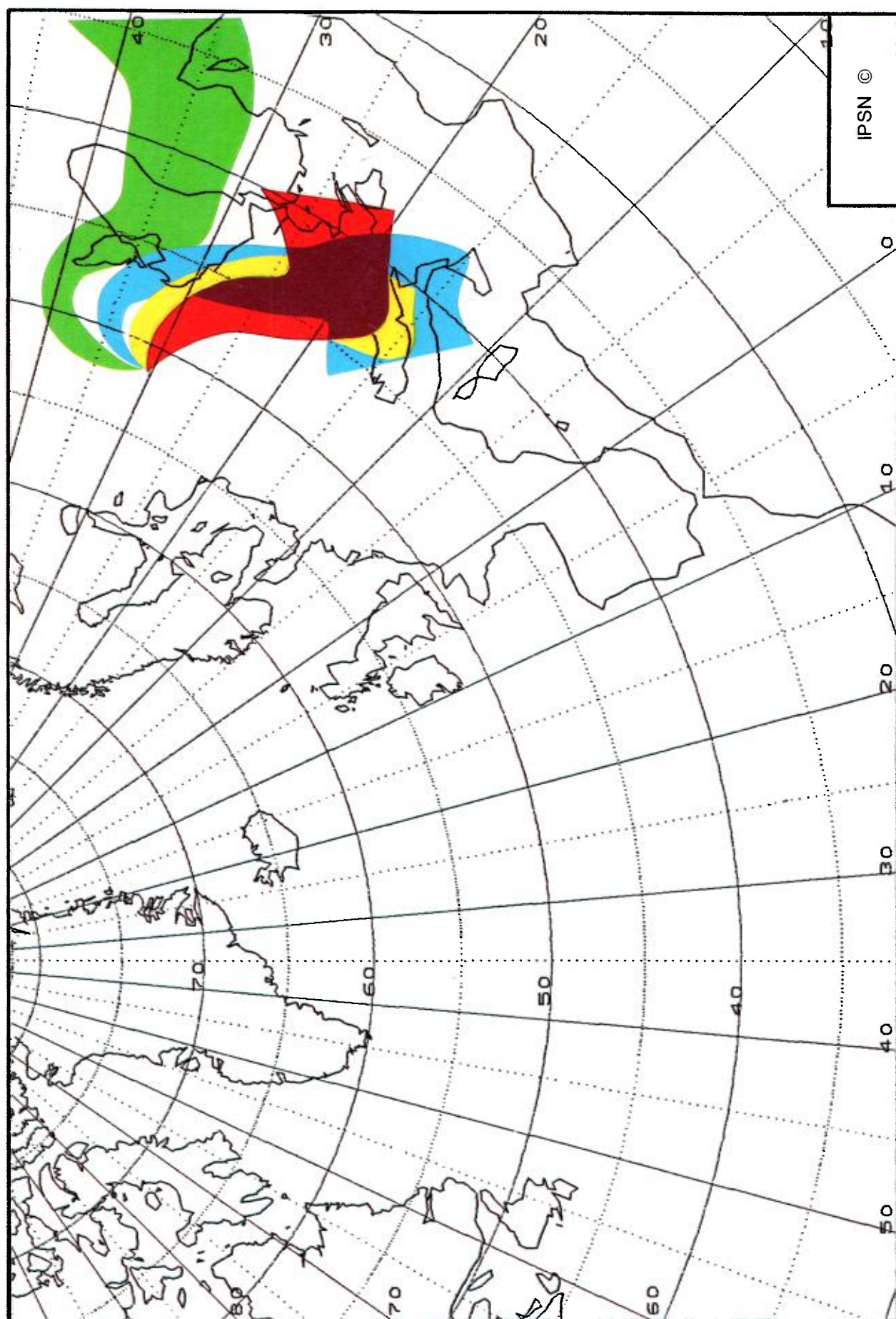


FIGURE 6-8



Rejets à 1500m - Trajectoires du 29/04/86 suivies jusqu'au 5 mai

■ rejet 0h T.U. ■ rejet 6h ■ rejet 12h ■ rejet 18h

FIGURE 6-9

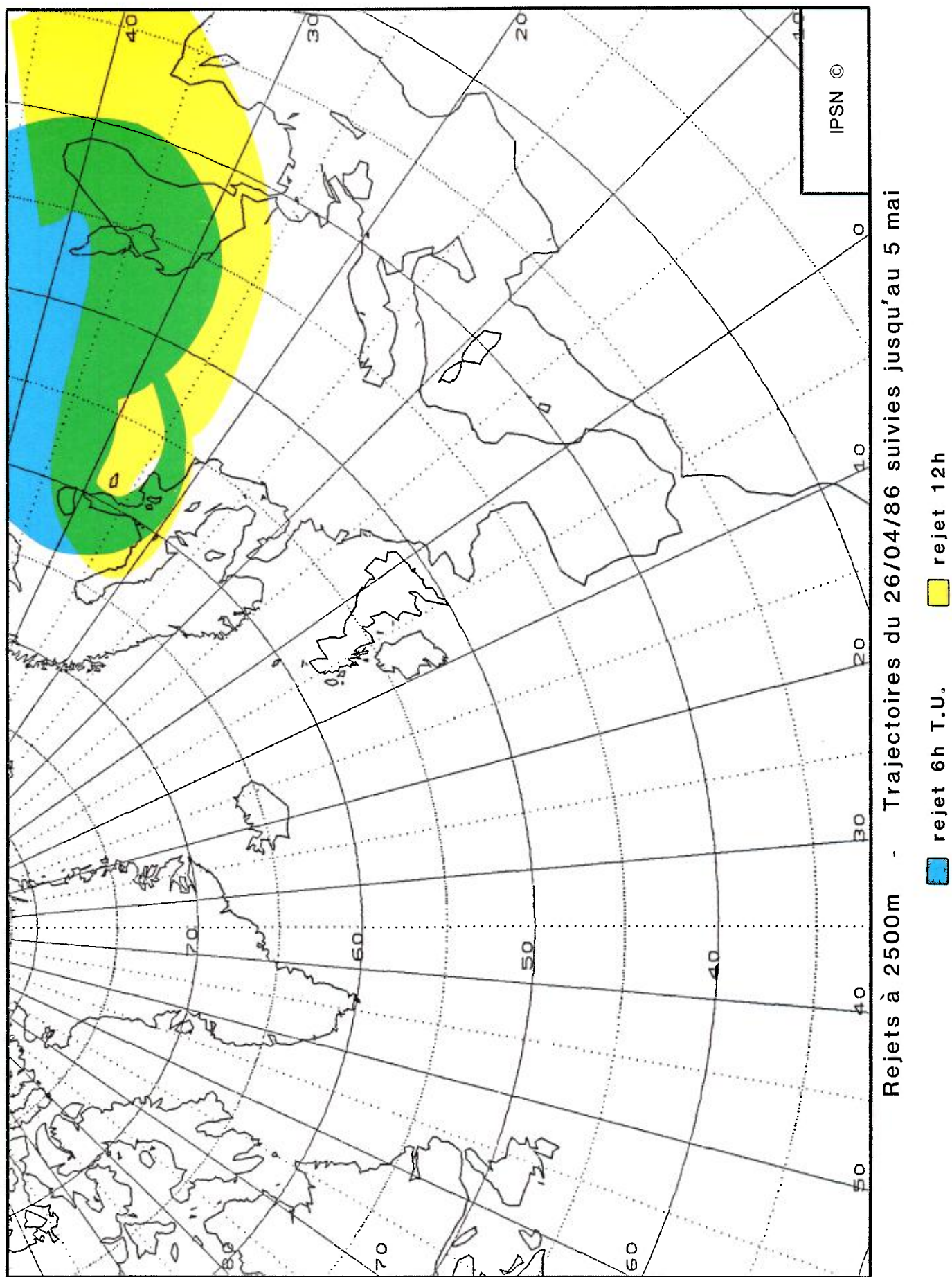


FIGURE 6-10

7. – MESURES DE RADIOACTIVITE

7.1. MESURES EN EUROPE DU 28 AVRIL AU 12 MAI 1986.

Les mesures de concentration atmosphérique provenant des différents pays d'Europe ont été reportées quotidiennement sur des cartes d'Europe et regroupées par pas de un demi degré selon la longitude et la latitude. C'est la valeur moyenne qui est représentée dans le cas de valeurs multiples dans une même zone ainsi définie.

Les concentrations atmosphériques sont divisées en 7 intervalles d'activité de même dimension, par rapport au maximum d'activité défini pour chaque carte. La décroissance quotidienne de l'activité maximale est ainsi mise en évidence.

Sur ces cartes seules sont reportées les valeurs d' ^{131}I et de ^{137}Cs , les deux radioéléments les plus fréquemment mesurés par les différents laboratoires. En ce qui concerne l' ^{131}I qui existe sous forme gazeuse et particulaire, tous les laboratoires n'ont pas utilisé de cartouche de charbon actif pour piéger l'iode gazeux en plus des filtres en papier à particules. Nous avons donc appliqué un facteur constant égal à 4 à toutes les mesures réalisées sans cartouche de charbon actif. Cette valeur moyenne est expérimentale et est déduite de différentes mesures effectuées avec ou sans cartouche, par certains laboratoires.

L'évolution de la radioactivité en fonction du temps peut être schématisée en sélectionnant quelques dates typiques. Jusqu'au 28 avril 1986, seuls les pays Scandinaves sont atteints par le nuage radioactif. Ce dernier s'étend à l'Europe occidentale pendant les deux jours suivants.

Les concentrations atmosphériques deviennent alors maximales en Bavière et en Italie du nord, le 1^{er} mai (figures 7-1 a et b). Le jour suivant, la zone contaminée s'étend au Royaume Uni et à l'Espagne dans les proportions certes beaucoup plus faibles (figures 7-2 a et b). On observe ensuite un net déplacement des zones les plus fortement contaminées vers l'Italie du Sud et la Grèce, le 5 mai par exemple (figures 7-3 a et b). Cette tendance va se poursuivre les jours suivants, tout en diminuant d'intensité. On remarquera que, notamment le 10 mai, l'activité a diminué d'un facteur 10 (figures 7-4 a et b). Ces résultats sont à rapprocher des cartes météorologiques fournies par certains pays.

On peut noter une bonne cohérence entre les concentrations atmosphériques de l' ^{131}I et du ^{137}Cs , notamment en ce qui concerne l'importance de la contamination de chaque pays. Toutefois bien évidemment l' ^{131}I tend à disparaître plus vite que le ^{137}Cs , du fait de sa courte période radioactive.

Les mesures de dépôts peuvent également être reportées sur des cartes similaires, mais les incertitudes sont beaucoup plus importantes, surtout en l'absence de données météorologiques (pluviométrie...) sur toute l'Europe.

Enfin l'Europe orientale est faiblement représentée mais, à l'heure actuelle, nous ne disposons pas encore de données concernant plus particulièrement la Bulgarie, la Hongrie, la Roumanie et la Tchécoslovaquie.

7.2. MESURES EFFECTUÉES EN FRANCE PAR LE GROUPE CEA

Nous avons eu connaissance de l'accident le dimanche 27 avril 1986 au soir, mais les premières augmentations de radioactivité imputables à cet accident ont été décelées dès le 29 avril dans le Sud-Est et l'Est de la FRANCE. Les mesures de radioactivité dans l'air et au sol ont été faites, en ce qui concerne le Commissariat à l'Energie Atomique, sur ou à proximité de ses sites et stations de mesures : SACLAY, ORSAY, BRUYERES-le-CHATEL, CADARACHE, MARCOULE, GRENOBLE, PIERRELATTE, DIJON, VERDUN, LA HAGUE, LE RIPALT et le BARP (CESTA). La carte (figure 7.5) précise leurs situations géographiques.

Les mesures concernant les produits de la chaîne alimentaire ont été faites sur des échantillons prélevés dans les régions des sites de SACLAY, CADARACHE, GRENOBLE, VALDUC et LA HAGUE.

7.2.1. Mesures atmosphériques

Il est utile de rappeler que le "bruit de fond" pour les radionucléides décelés est nul en temps normal, sauf pour le Césium 137 dont la concentration en certains points du territoire peut atteindre 10^{-6} Bq/m³.

Il est intéressant de noter que la radioactivité de l'air est restée presque à son maximum durant trois jours dans le Sud-Est (MARCOULE, CADARACHE) alors qu'elle ne s'est maintenue à son maximum qu'une journée dans l'Est et dans la Région Parisienne.

Durant les cinq jours qui ont suivi, les concentrations atmosphériques ont rapidement décliné de deux décades pour remonter de façon significative aux alentours du 5 au 10 mai selon les sites, avant de décroître à nouveau.

A titre d'exemple, et pour quelques radionucléides, les données fournies sont schématisées par les graphiques numérotés de 7.6 à 7.11 pour les sites de CADARACHE, MARCOULE, GRENOBLE, VERDUN, SACLAY et ORSAY. La valeur maximale enregistrée en ¹³¹I est de 18 Bq/m³ sur le site de SACLAY (avec filtre destiné à piéger les aérosols + cartouche à charbon actif).

7.2.2. Mesures de dépôts

Les valeurs de dépôts ont été mesurées sur la végétation, sauf à CADARACHE où on dispose de mesures sur des prélèvements de sol effectués le 20 mai (15 KBq/m² pour l'Iode 131 ramené au 5 mai). Les valeurs les plus élevées sont bien évidemment observées pour les sites où il a plu pendant le passage du panache. Seuls les sites de MARCOULE, LA HAGUE, SACLAY et CADARACHE ont fourni des mesures de dépôts pour un nombre important de radionucléides.

7.2.3. Mesures sur la chaîne alimentaire

a) Mesures de la radioactivité du lait

Les valeurs maximum pour l'Iode 131 ont été enregistrées dans l'Est (480 Bq/l à VALDUC) et dans le Sud-Est (à CADARACHE : 180 Bq/l, à GRENOBLE : 233 Bq/l).

Les évolutions de la concentration d'Iode 131 et de Césium 137 sont données pour les sites de VALDUC et GRENOBLE sur les graphiques 7.12 et 7.13.

On a noté la plus forte radioactivité du lait de chèvre par rapport au lait de vache (2000 Bq/l pour l'Iode 131 près du site de CADARACHE) ; son évolution au cours du temps figure sur le graphique 7.14.

b) Mesures de la radioactivité dans le végétaux

A titre d'exemple sur le graphique 7.15 on peut voir l'évolution de la radioactivité de salades prélevées chaque jour sur un même lieu dans la région de CADARACHE (VINON). On note plusieurs remontées successives de la radioactivité mesurée.

Tout au long du déroulement de l'accident, nous avons échangé les résultats des mesures pratiquées au C.E.A. avec Monsieur le Professeur PELLERIN, Directeur du S.C.P.R.I. qui nous a fourni les données permettant de valider nos modèles et nous tenons à l'en remercier.

°°

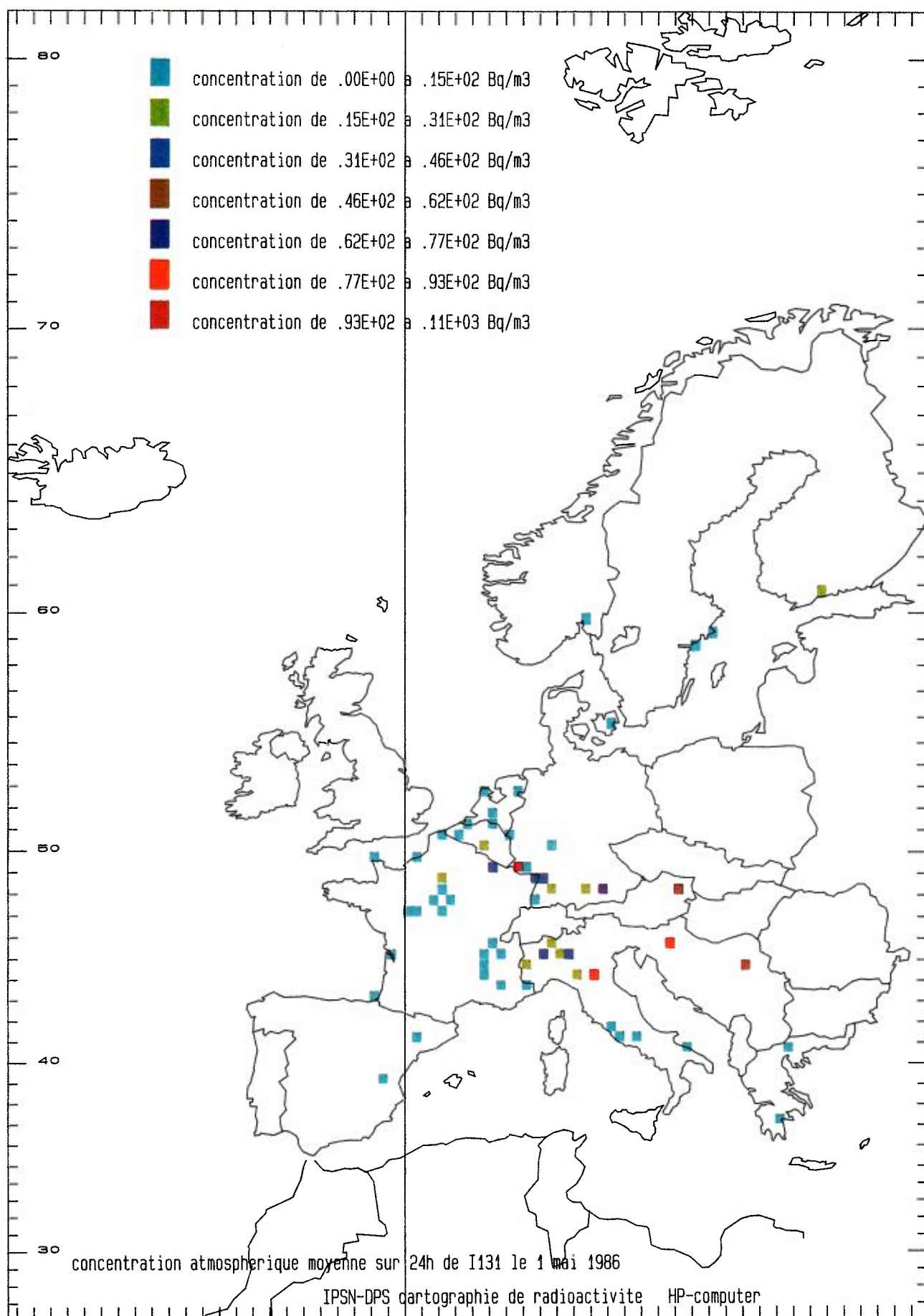


FIGURE 7-1 a

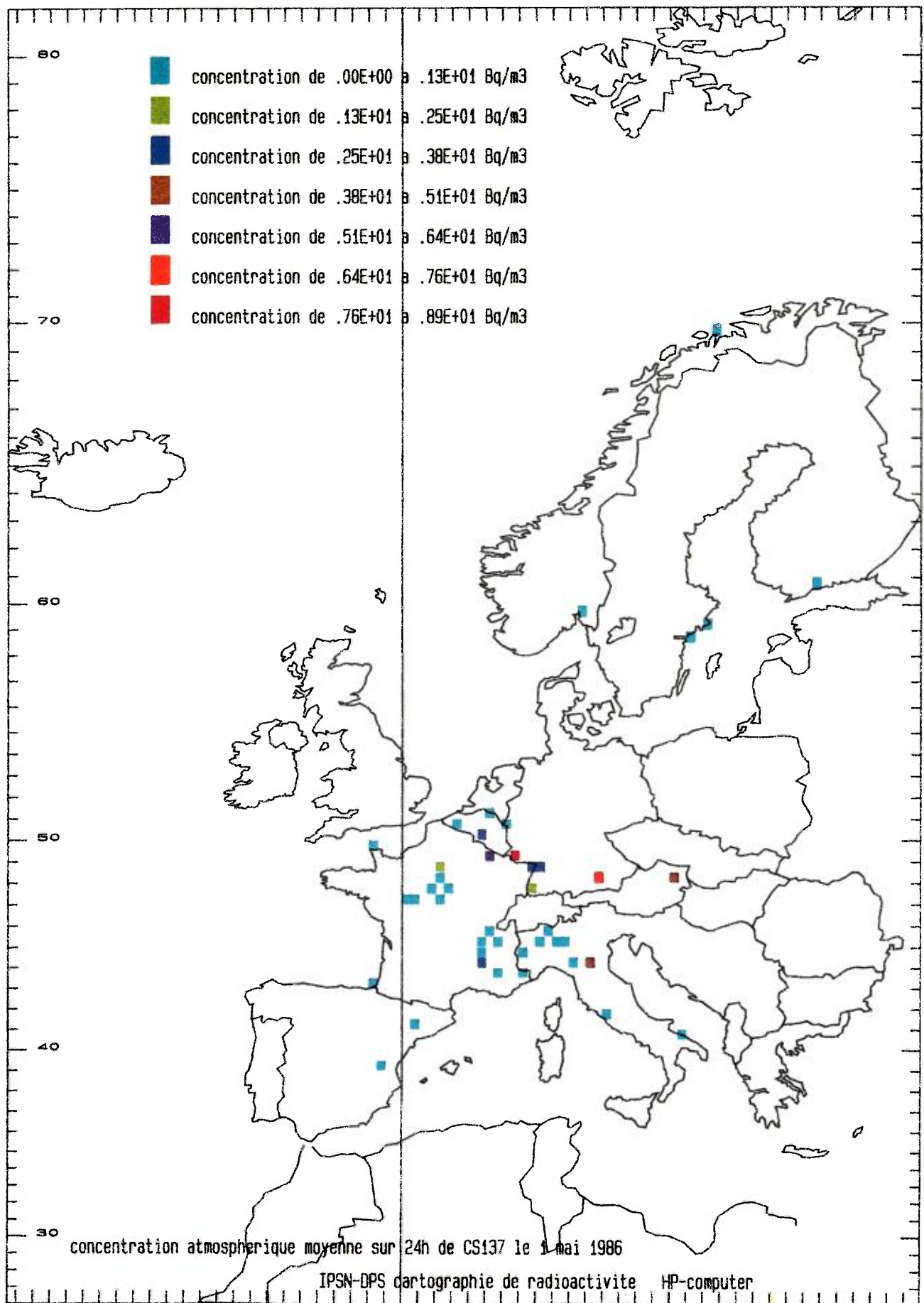


FIGURE 7-1 b

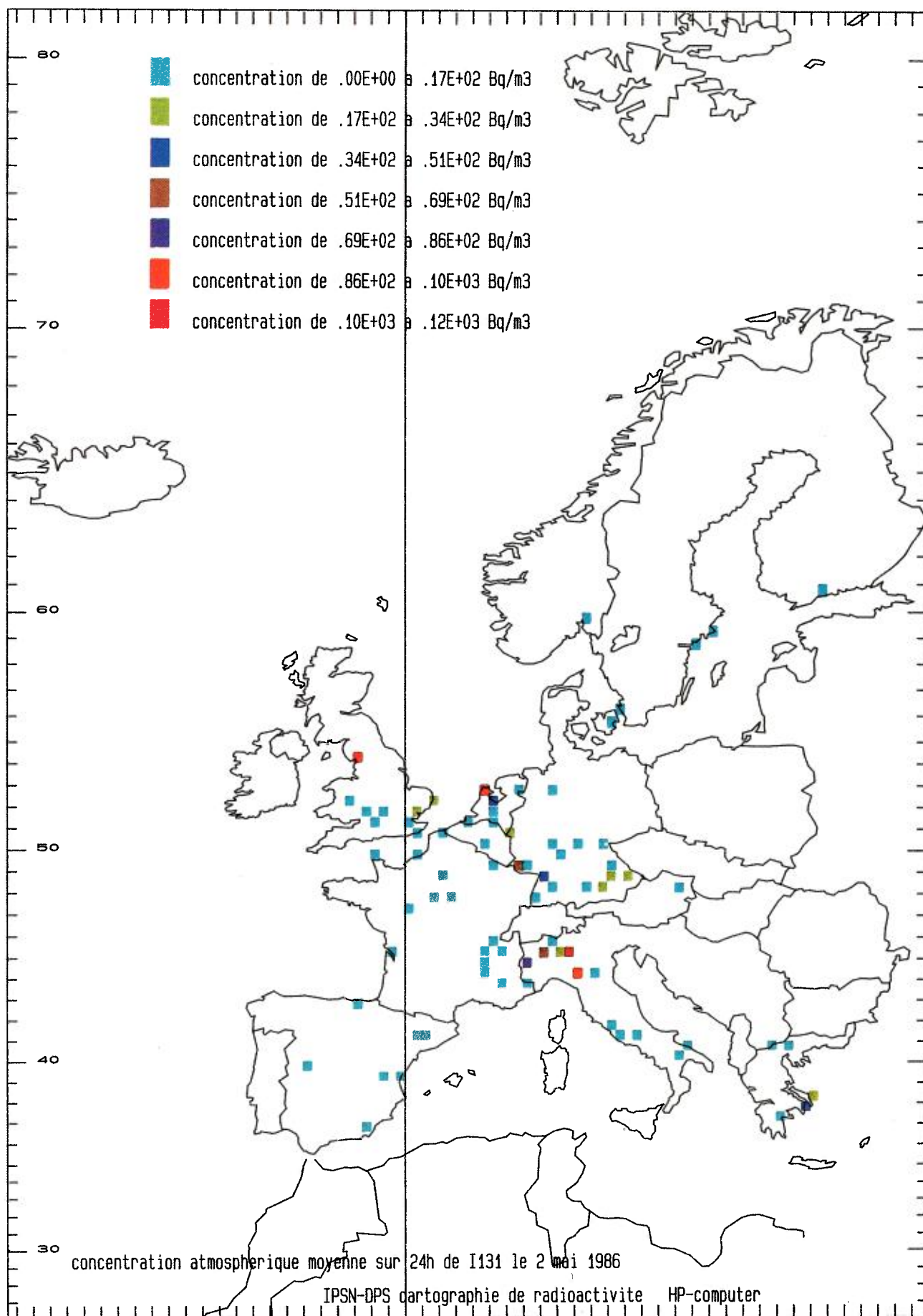


FIGURE 7-2 a

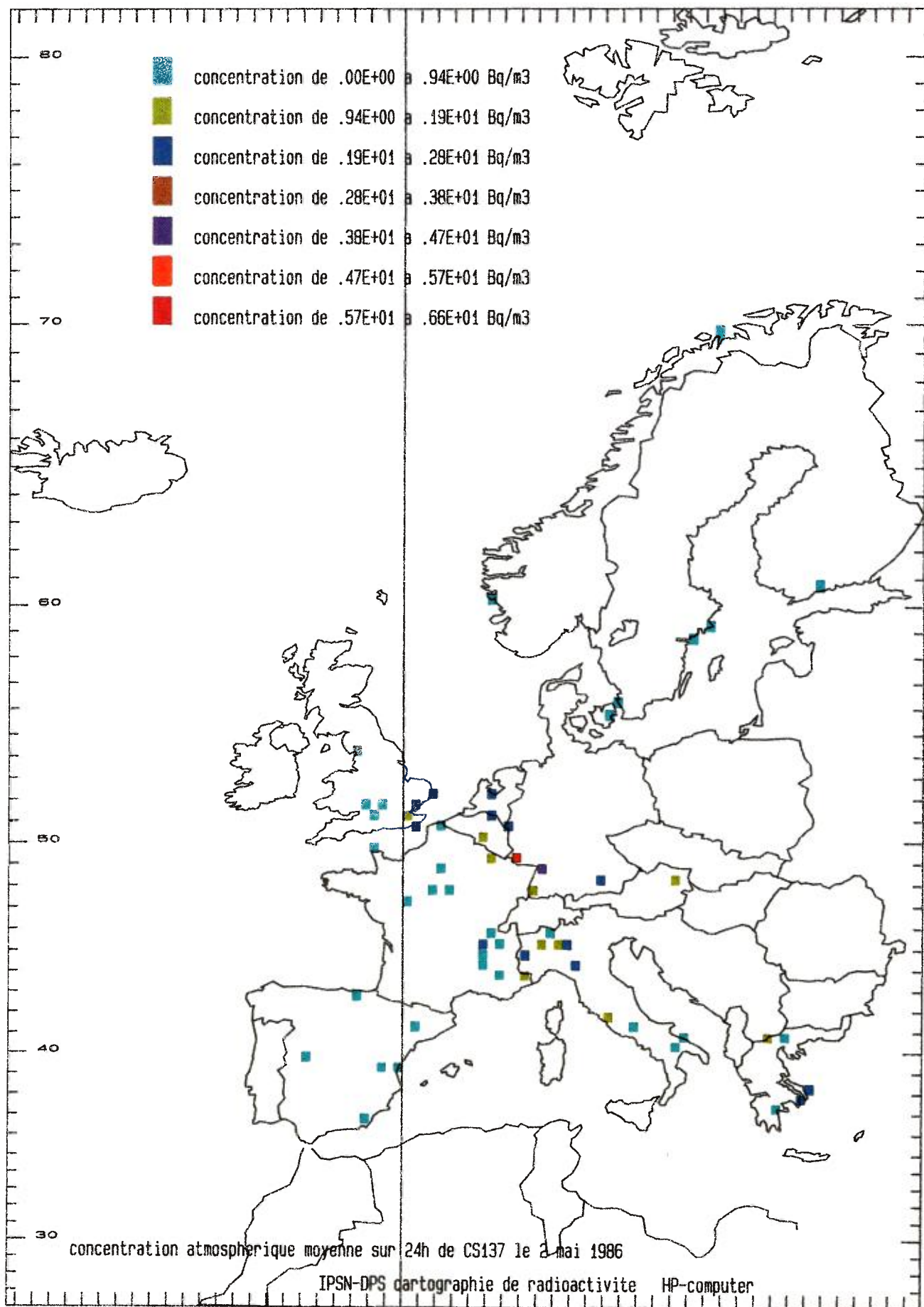


FIGURE 7-2 b

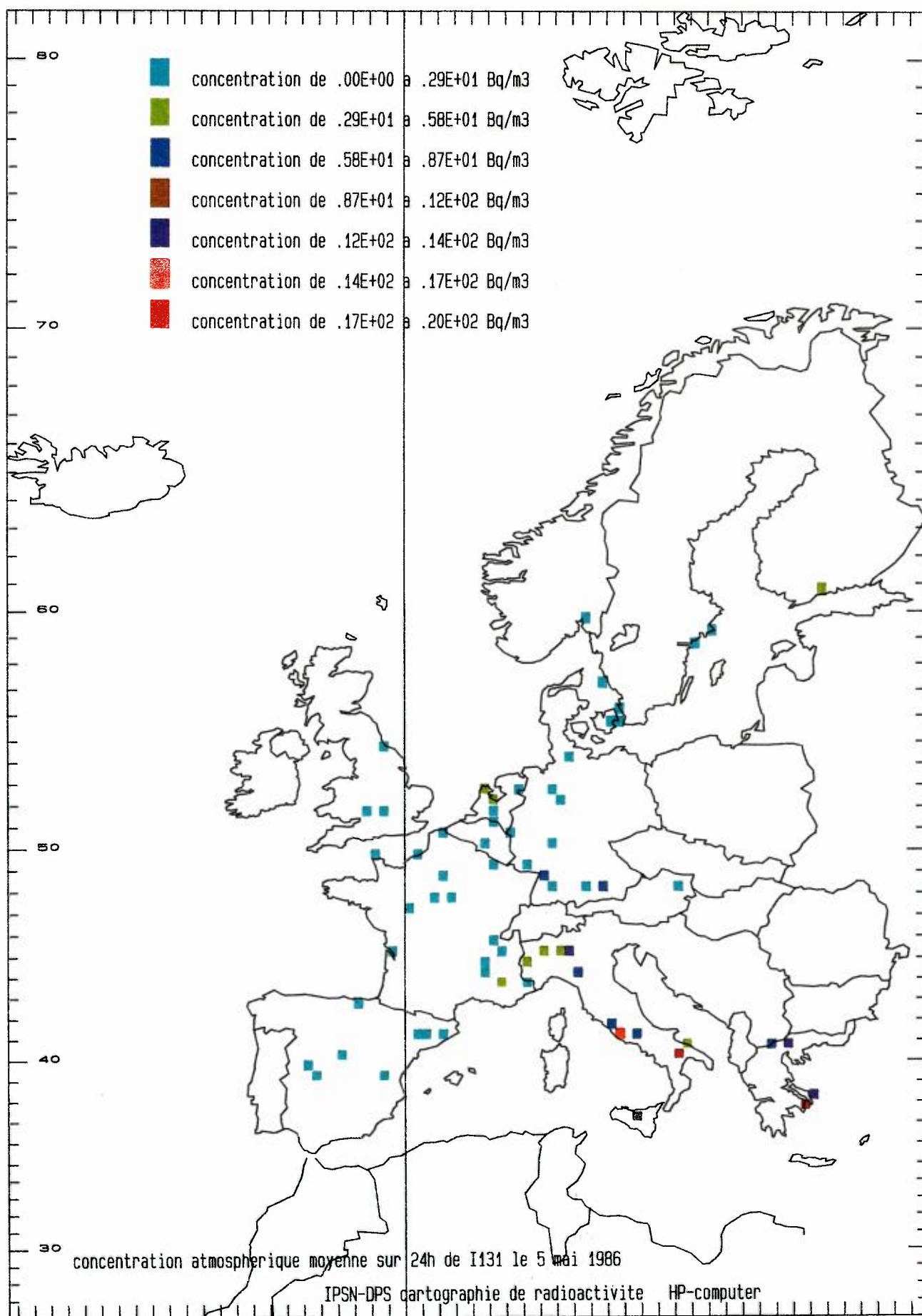


FIGURE 7-3 a

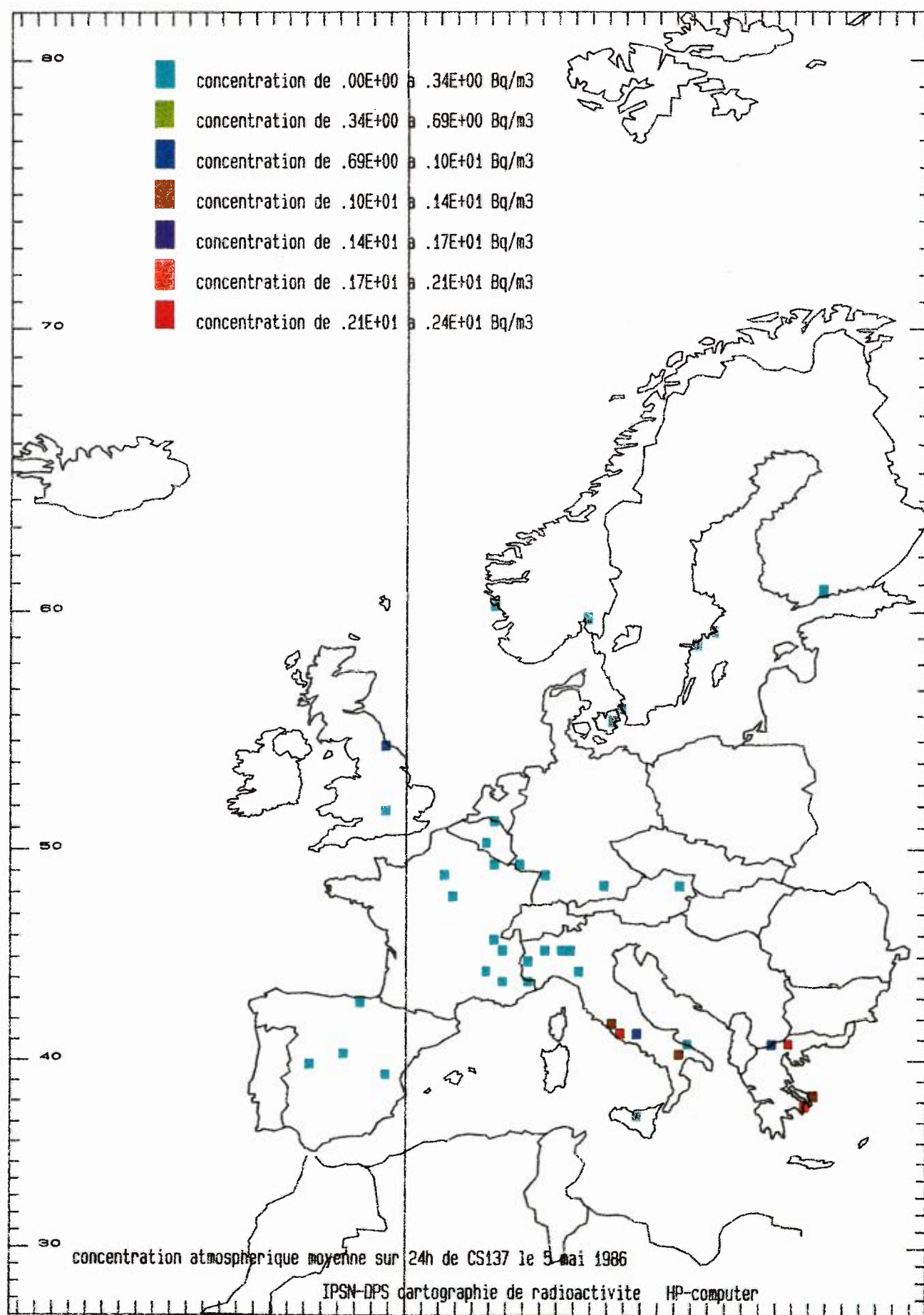


FIGURE 7-3 b

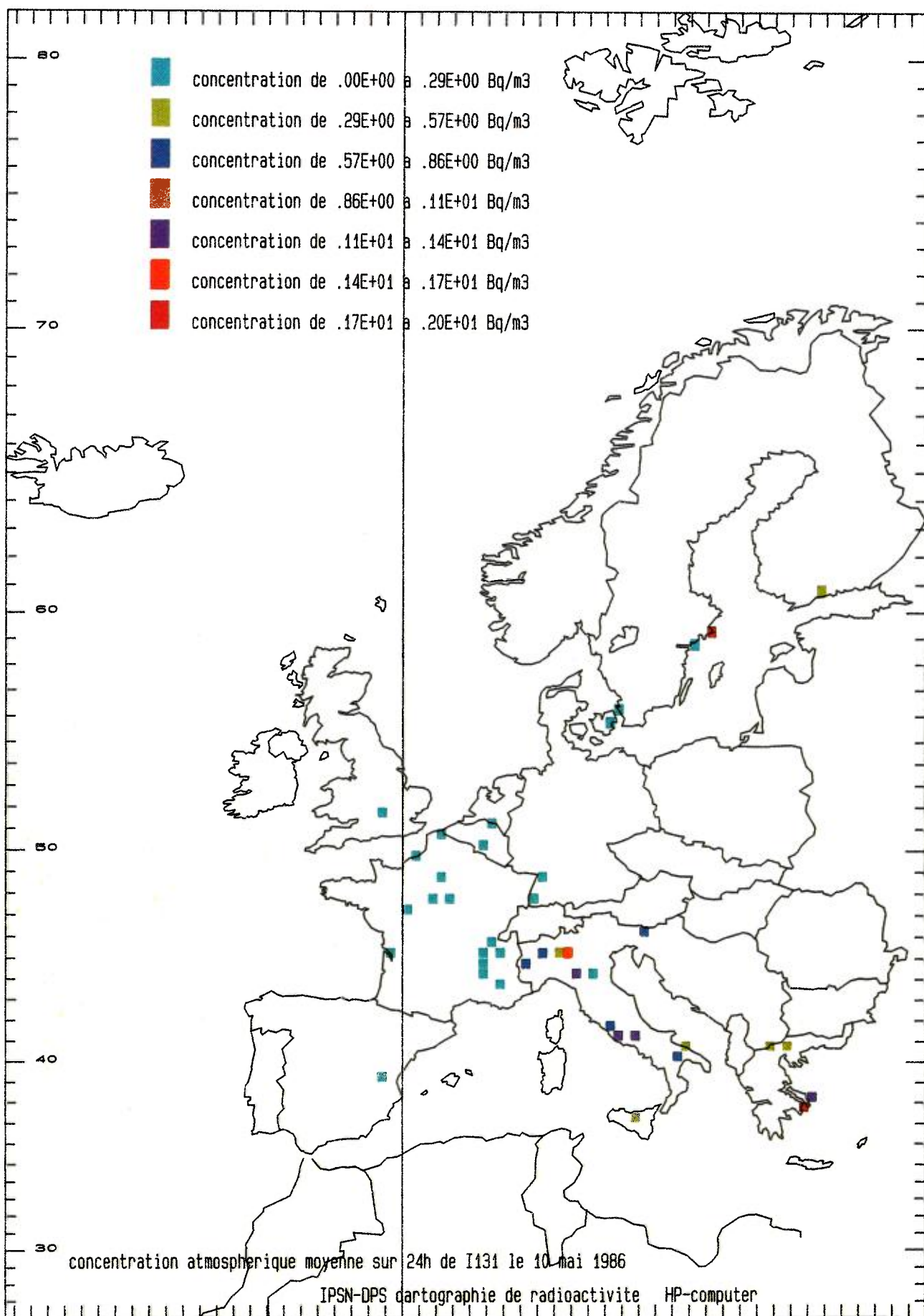


FIGURE 7-4 a

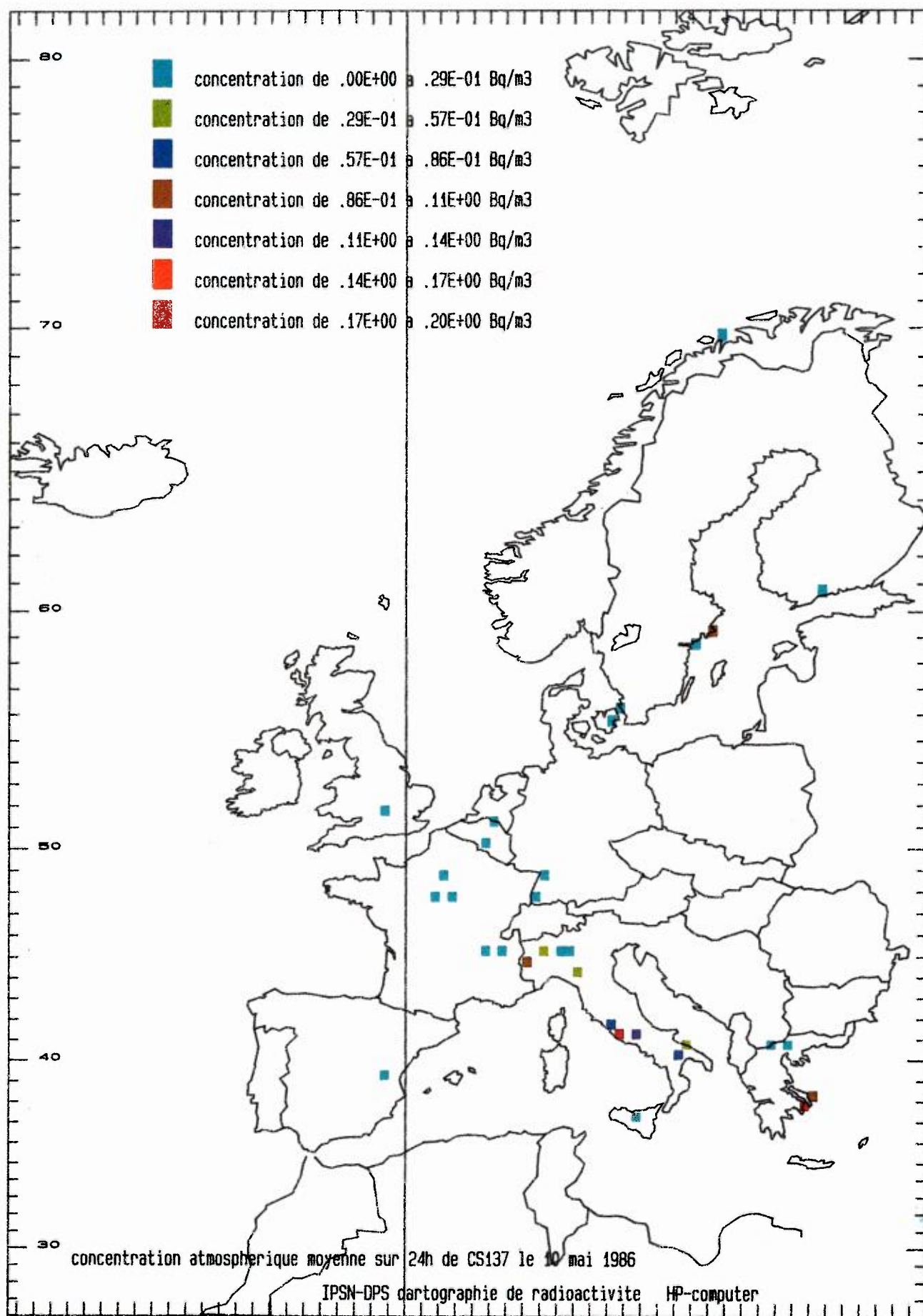


FIGURE 7-4 b

LOCALISATION DES STATIONS DE MESURES (*)



(1) Orsay, très voisin de Saclay, est localisé par le même repère
 (2) Bruyères-le-Chatel est symbolisé par B III

FIGURE 7-5

CONCENTRATION ATMOSPHERIQUE

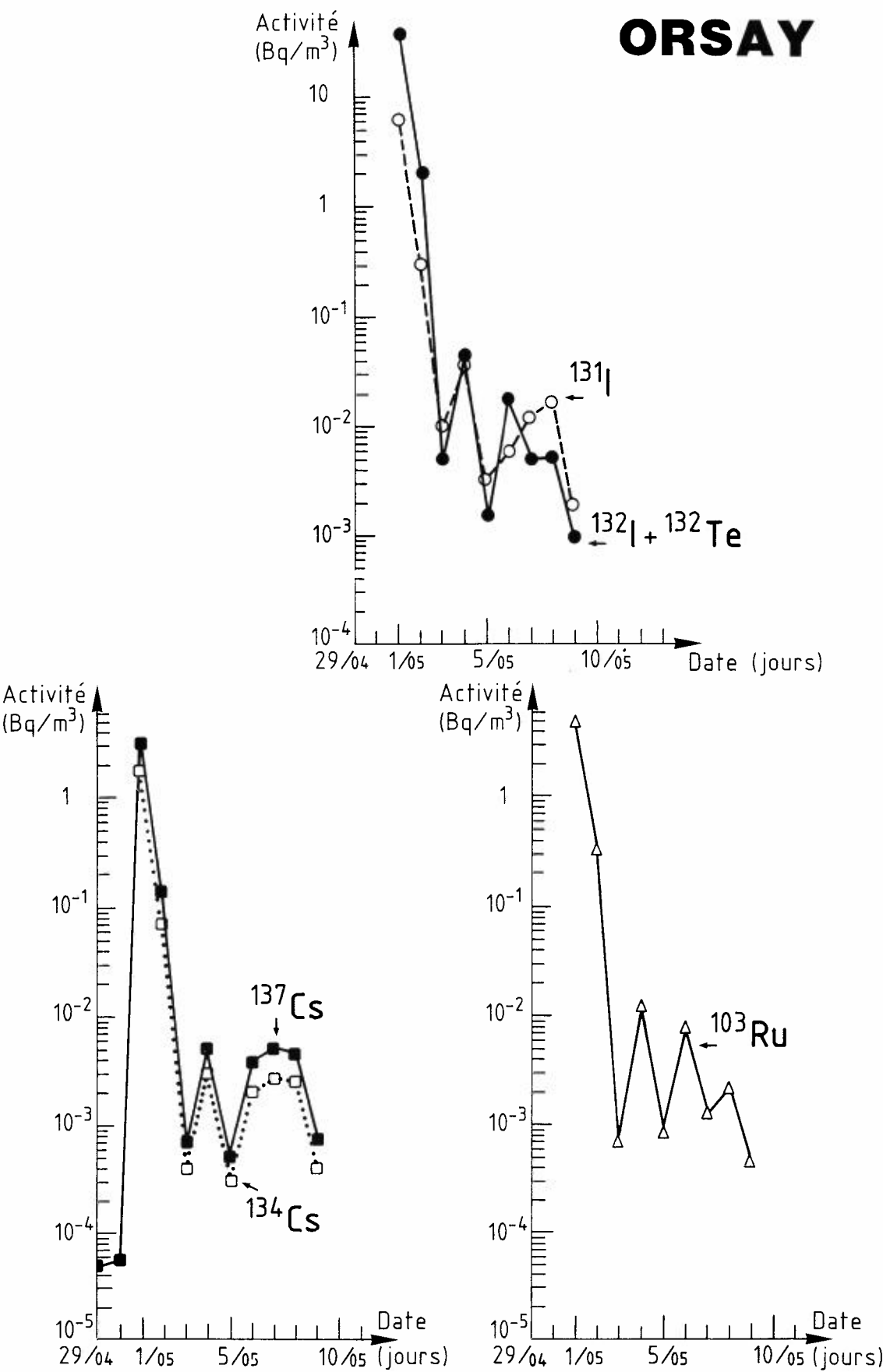


FIGURE 7-6

CONCENTRATION ATMOSPHERIQUE

SACLAY

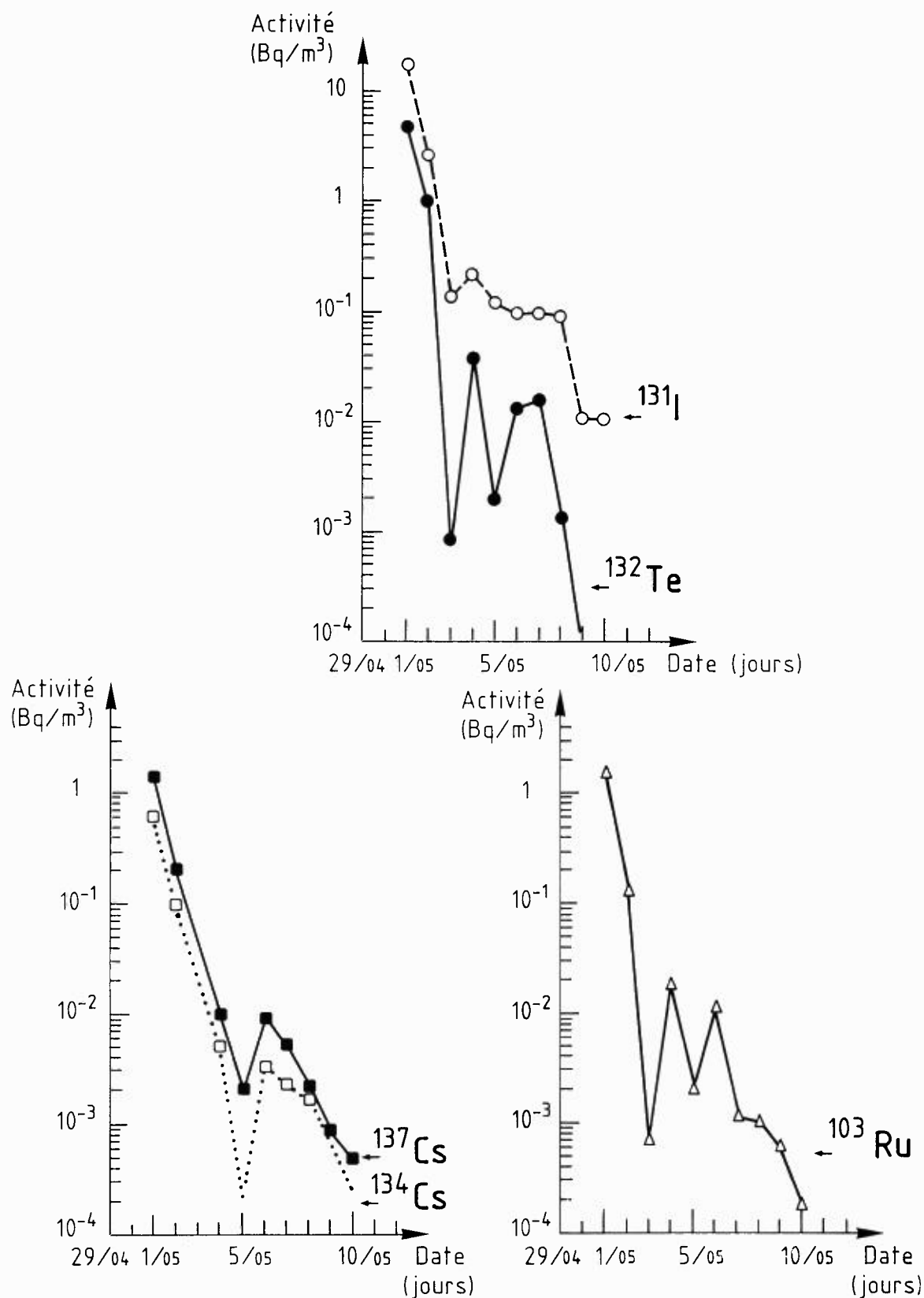


FIGURE 7-7

CONCENTRATION ATMOSPHERIQUE

VERDUN

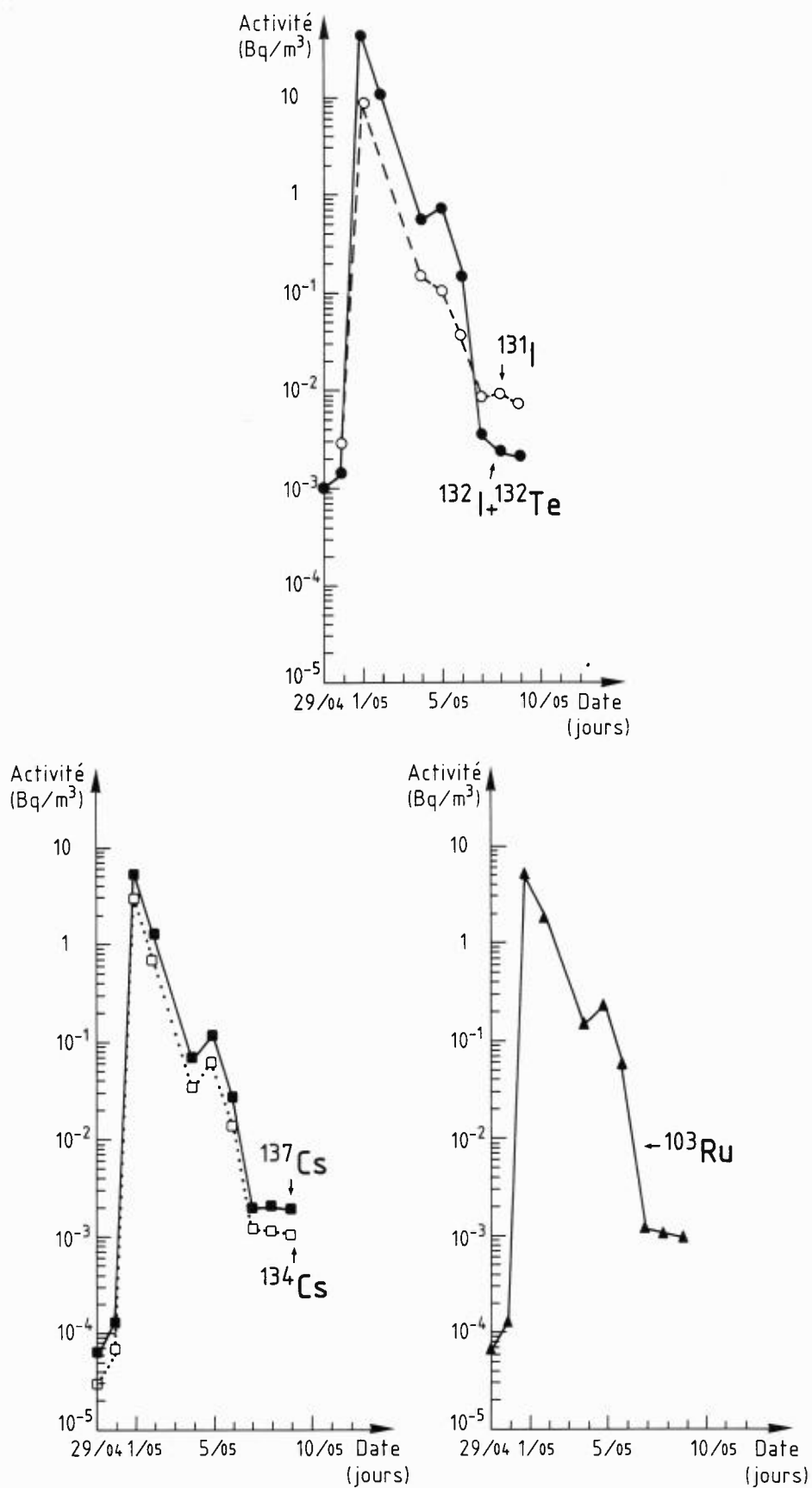


FIGURE 7-8

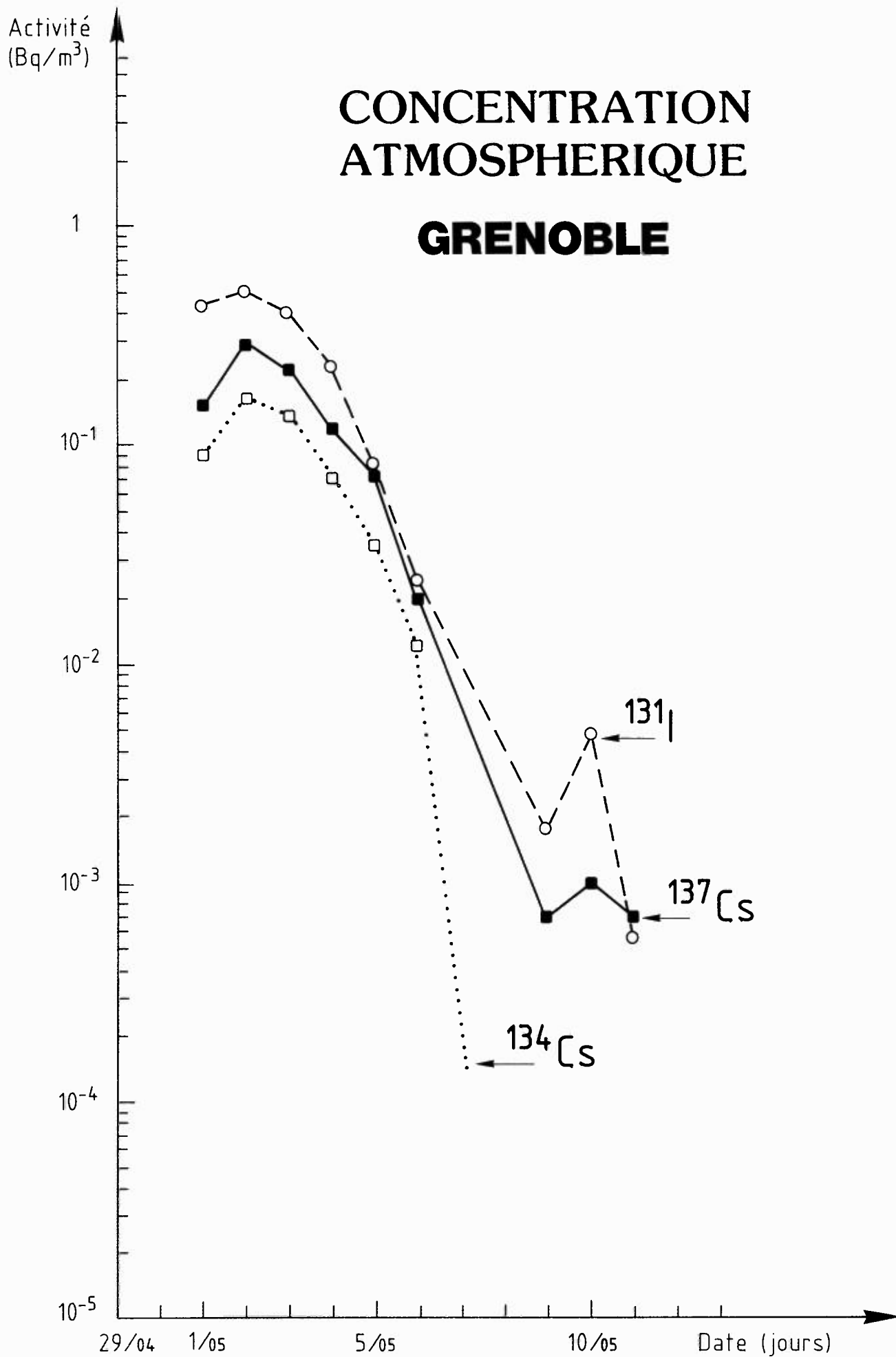


FIGURE 7-9

CONCENTRATION ATMOSPHERIQUE

MARCOULE

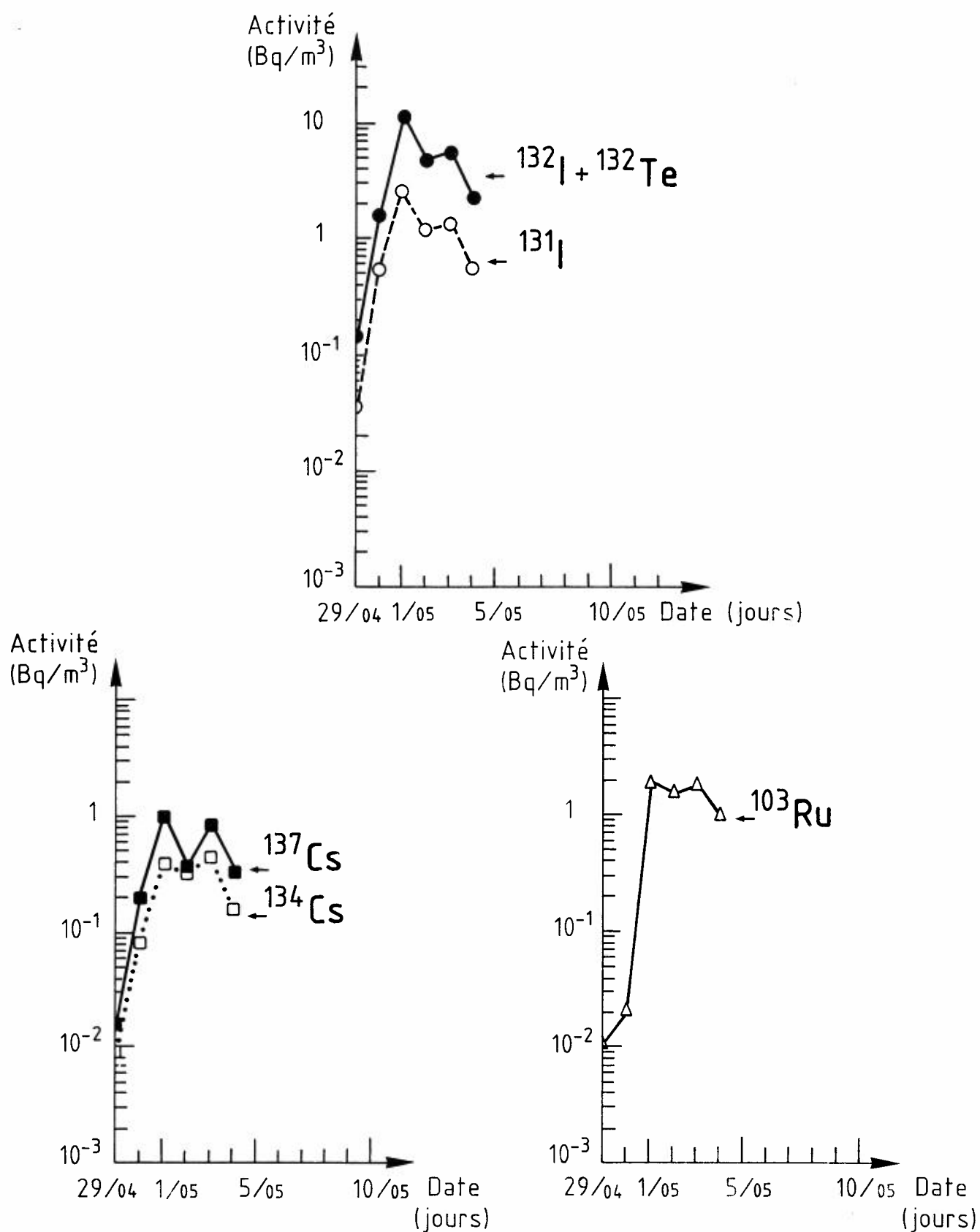


FIGURE 7-10

CONCENTRATION ATMOSPHERIQUE

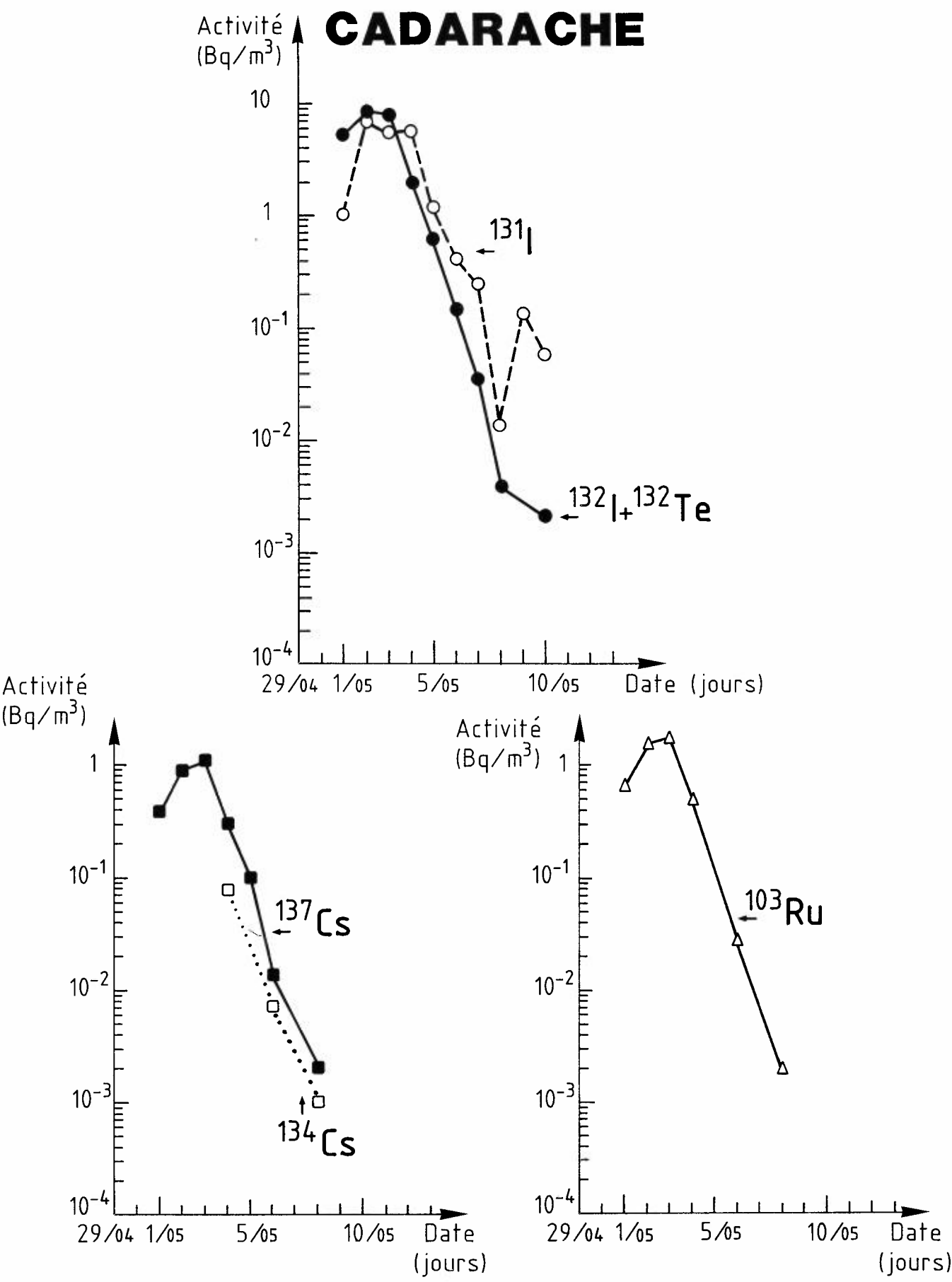


FIGURE 7-11

CONCENTRATION DANS LE LAIT DE VACHE

GRENOBLE

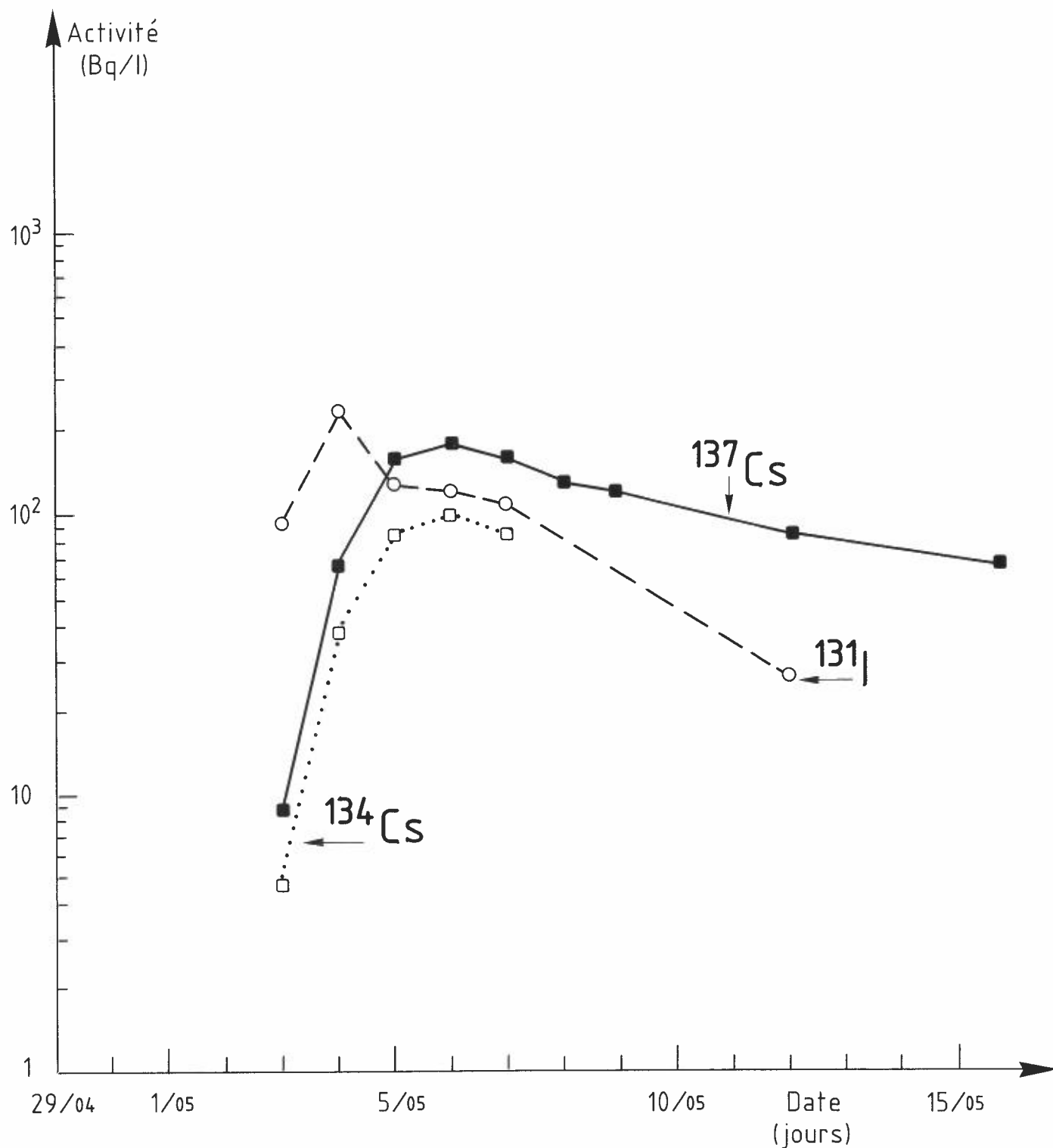


FIGURE 7-12

CONCENTRATION DANS LE LAIT DE VACHE

VALDUC

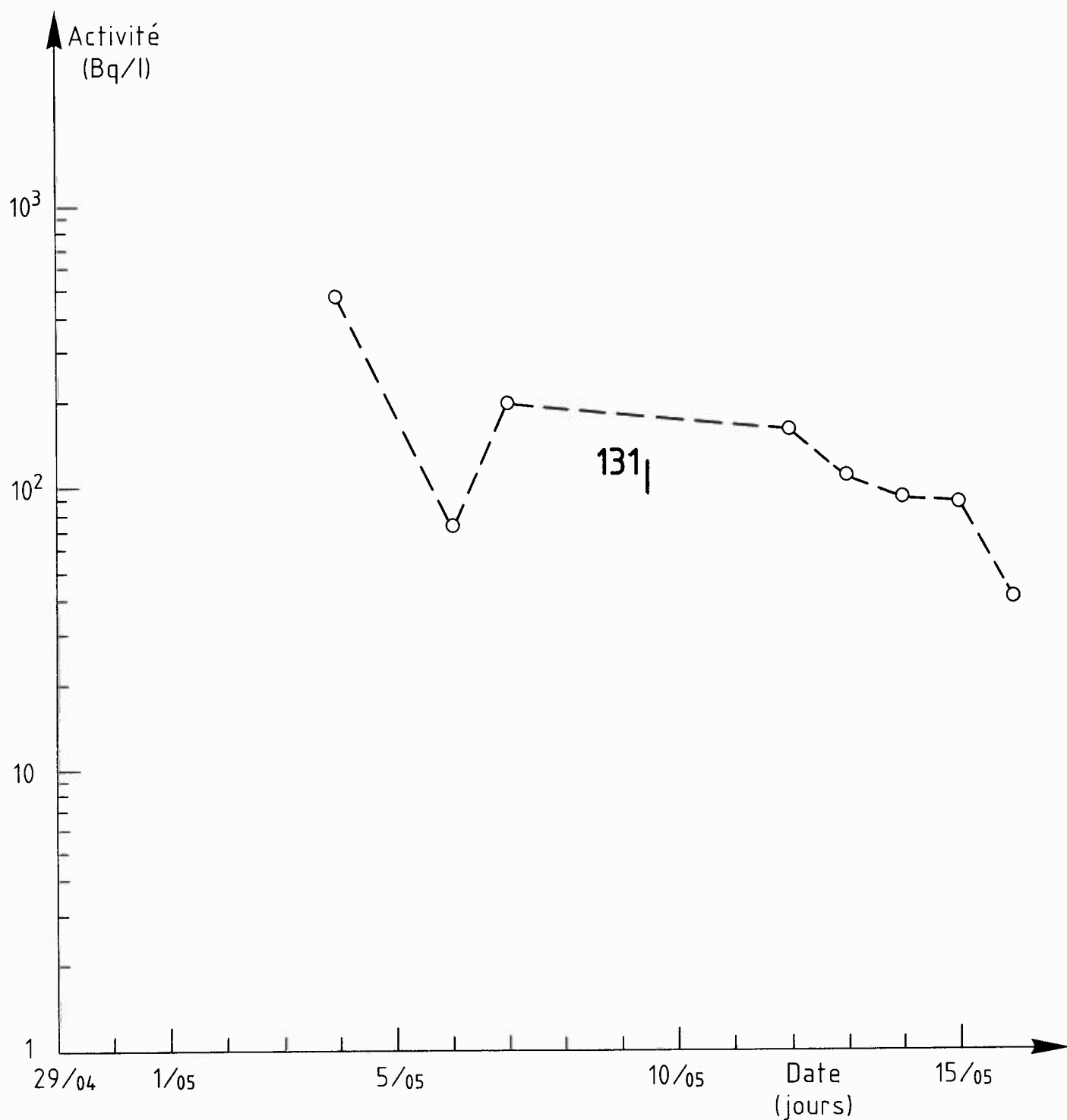


FIGURE 7-13

CONCENTRATION DANS LE LAIT DE CHEVRE **CADARACHE**

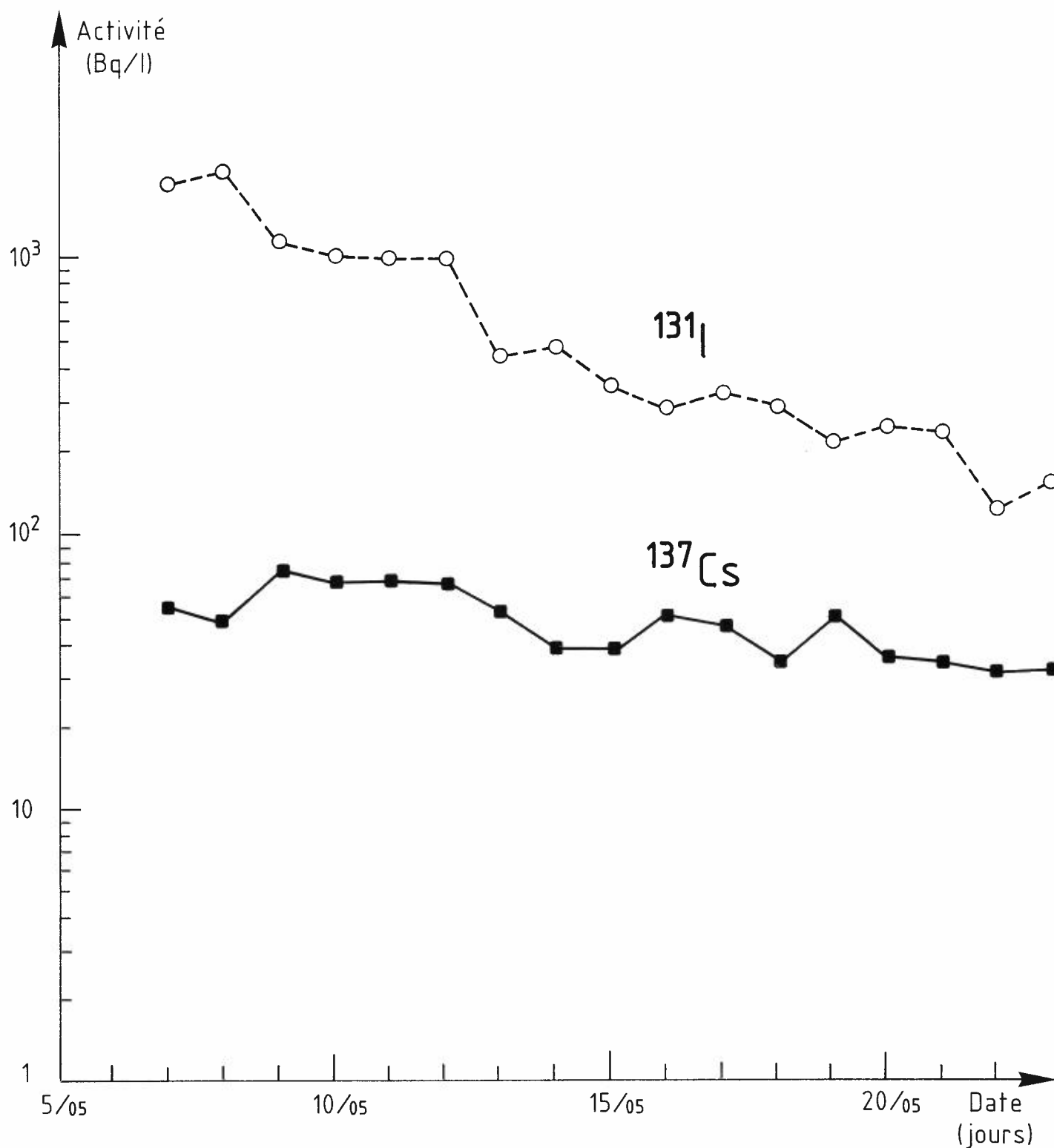


FIGURE 7-14

DEPOT SUR LES LEGUMES VERTS

CADARACHE

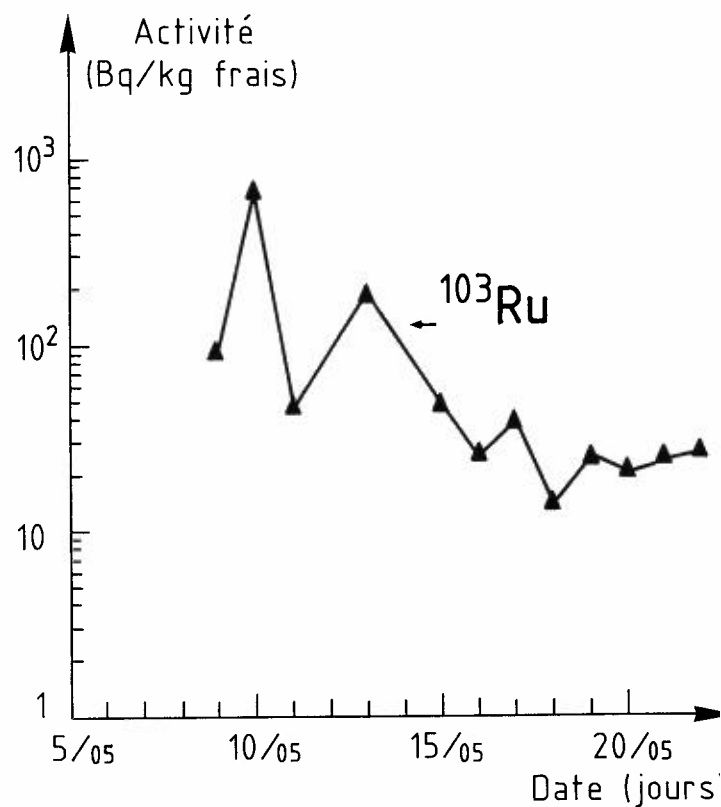
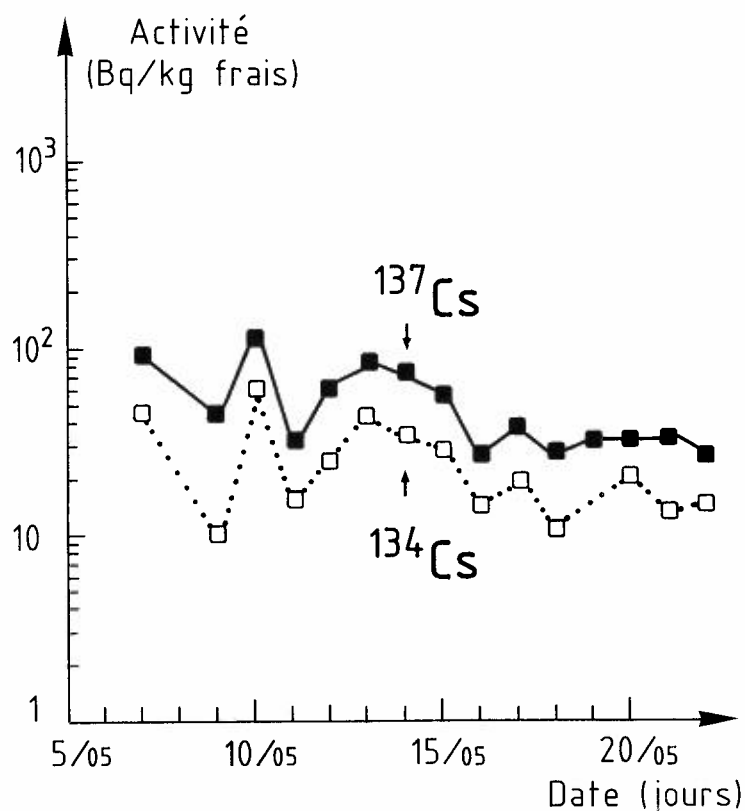
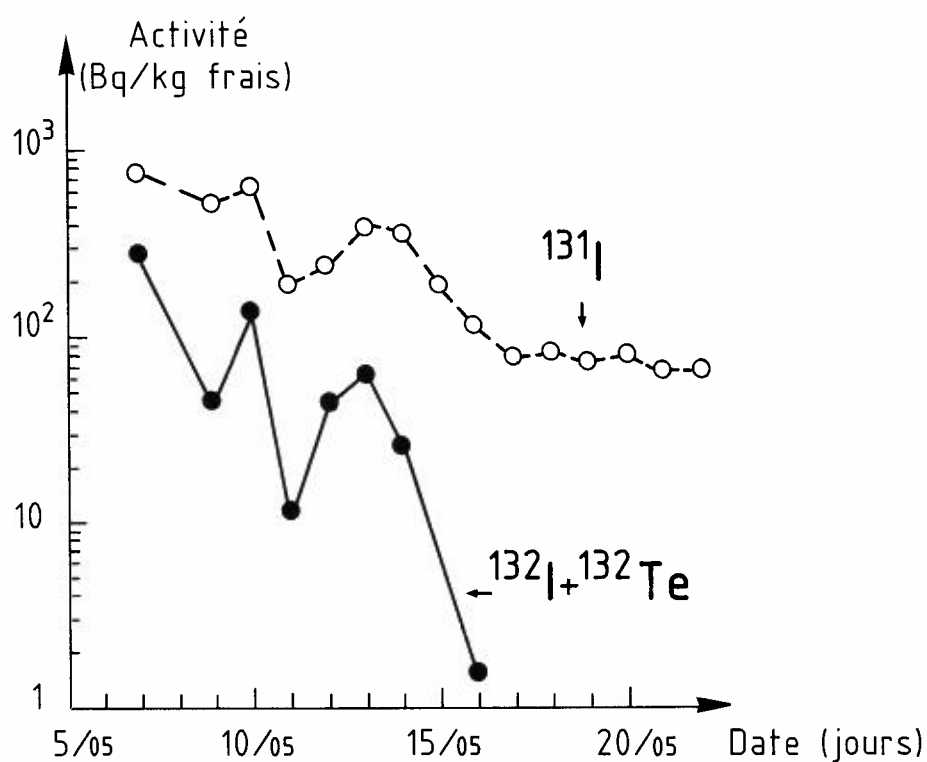


FIGURE 7-15

8. – LES CONSEQUENCES SANITAIRES

Après un accident nucléaire, l'homme peut-être exposé aux radiations par différentes voies. L'exposition externe se produit au moment du passage du panache et ensuite provient des particules d'aérosols radioactifs qui se sont déposées sur le sol. L'exposition interne provient de l'inhalation des aérosols radioactifs pendant le passage du panache et ensuite de l'ingestion d'aliments contaminés.

8.1. EXPOSITION DUE AU MILIEU PHYSIQUE EN FRANCE (atmosphère et sol)

8.1.1. Méthode utilisée pour l'exploitation des résultats

Les calculs sont basés sur les mesures d'activité atmosphérique et d'activité des dépôts quand ces dernières ont été fournies. Dans le cas contraire, les dépôts ont été estimés à partir des concentrations atmosphériques intégrées (Bq.s.m^{-3}) en tenant compte des situations météorologiques propres à chaque site, ce qui nous a conduit à choisir les vitesses apparentes de dépôt suivantes (après recalages sur des mesures réelles) :

$5.10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$ Pluviométrie de l'ordre de 10 mm pendant le passage du panache,

10^{-2} m.s^{-1} Pluviométrie de l'ordre de 5 mm,

$5.10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ Pluviométrie inférieure à 5 mm,

Dans l'ensemble, pour l'exposition externe au panache et interne par inhalation, les radionucléides mesurés et donc utilisés dans les calculs sont : ^{131}I , ^{132}Te - ^{132}I , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{134}Cs , ^{136}Cs , ^{137}Cs , ^{140}Ba - ^{140}La , ^{99}Mo , avec en plus pour certains sites ^{95}Zr , ^{95}Nb , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{125}Sb , ^{127}Sb , $^{129\text{m}}\text{Te}$, ^{133}I , $^{131\text{m}}\text{Te}$, ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{239}Np .

En ce qui concerne les mesures de concentration atmosphérique de l'iode 131, des différences importantes ont été observées selon que les prélèvements étaient faits uniquement sur filtre destiné à piéger les aérosols, ou sur ce même type de filtre suivi d'une cartouche à charbon actif destinée à capter l'iode non particulaire, (comme à SACLAY et CADARACHE). Ceci nous a conduit à interpréter les mesures des autres sites en utilisant un facteur multiplicatif moyen de quatre.

Pour LA HAGUE, qui n'a pas fourni de mesure d'iode 131 dans l'atmosphère, on a estimé l'activité de ce radionucléide à partir de celle du Césium 137, en se recalant sur le rapport de la concentration de l'iode 131 à celle du Césium 137 déduit des mesures sur le site de SACLAY.

Pour l'exposition externe aux dépôts, les radionucléides pris en compte sont dans l'ensemble : ^{131}I , ^{132}Te - ^{132}I , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{134}Cs , ^{136}Cs , ^{137}Cs , ^{140}Ba - ^{140}La et ^{99}Mo .

8.1.2. Calcul des doses et présentation des résultats

8.1.2.1. Exposition au panache en équivalent de dose efficace

L'exposition externe au panache et l'exposition interne par inhalation sont calculées à partir des concentrations atmosphériques intégrées (Bq.s.m^{-3}) déduites du suivi des mesures dans le temps.

Les résultats en équivalents de dose efficace sont présentés dans le tableau 8-1.

Ils ont été obtenus en deux étapes :

- la première considère une présence permanente à l'extérieur sans aucune protection pendant le passage du panache, et donne des valeurs théoriques maximales,
- Ensuite, pour tenir compte de la réalité, on a appliqué des facteurs de correction. Ceux-ci considèrent que 20 % du temps sont passés à l'extérieur. Quant aux 80 % du temps passés à l'intérieur des habitations, ils sont pondérés par le facteur de protection moyen de 0,2 contre le rayonnement dont l'origine est à l'extérieur des logements. Ces facteurs prennent en compte les proportions respectives des populations rurales et urbaines en France.

8.1.2.2. Exposition d'un adulte par inhalation en terme d'équivalent de dose engagé thyroïde

La totalité des radionucléides mesurés a été prise en compte pour ces calculs. Les équivalents de dose engagés à la thyroïde par inhalation sont donnés dans le tableau 8-2. Les résultats ont été obtenus avec les mêmes hypothèses de calcul que celles utilisées au paragraphe précédent.

8.1.2.3. Exposition externe aux dépôts en équivalent de dose efficace reçu pendant un an

Comme indiqué en 8.1.1. deux cas différents se présentent :

- 1 - On dispose de mesures de dépôts au sol (CADARACHE) directement utilisables, ou de mesures de dépôts sur l'herbe ou les végétaux (LA HAGUE, SACLAY, MARCOULE) à partir desquelles on peut estimer les dépôts totaux sur le sol (à l'aide des facteurs de captation par la végétation).
- 2 - On ne dispose d'aucune mesure de dépôt, et on ne peut que les estimer à partir des concentrations atmosphériques intégrées.

Pour les calculs d'exposition externe, on a considéré que les dépôts se maintenaient en surface pendant l'année suivant l'accident. Cette hypothèse simplificatrice, qui conduit à une importante surestimation de l'exposition est en outre inexacte pour un sol couvert d'une végétation qui a été récoltée ou en milieu urbain. Les valeurs calculées sont donc fortement surestimées.

Les résultats en équivalents de dose efficace pour l'année suivant l'accident sont présentés dans le tableau 8-3. Ceux qui correspondent à des mesures de dépôts (au sol ou sur la végétation) sur les sites ou au voisinage sont encadrés.

Les calculs ont été effectués en utilisant les mêmes hypothèses que pour estimer les expositions dues au panache.

Une pluviométrie très élevée pendant le passage du nuage majore l'importance de cette voie d'atteinte.

8.1.2.4. Récapitulation sur l'exposition au milieu physique pour la première année après l'accident

Elle est présentée en équivalent de dose efficace dans le tableau 8-4. Les facteurs de correction précédemment proposés sont pris en compte.

On peut comparer cette exposition estimée pour la première année suivant l'accident avec

celle qui a été déterminée pour la radioactivité naturelle (Figure 8.1, débit de dose exposition externe *) ramenée en équivalent de dose efficace reçu pendant le même temps.

On constate, en tout état de cause, que l'exposition due à l'accident de **Tchernobyl** reste inférieure à celle qui résulte de la radioactivité naturelle.

8.2. EXPOSITION DUE A L'INGESTION

Les transferts à l'homme dépendants de la chaîne alimentaire ont deux origines. Les transferts qui proviennent du dépôt des radionucléides sur les végétaux sont qualifiés de directs. Les transferts indirects font intervenir l'absorption par la voie racinaire.

L'interprétation des résultats de mesures relatifs à la chaîne alimentaire ne concerne que les transferts directs dus aux retombées du nuage. On a considéré que les conséquences de ces transferts pouvaient s'observer pendant deux mois (croissance et renouvellement des couvertures végétales pour l'herbe de pâture et les légumes feuilles). Le suivi des transferts indirects demande nécessairement plus de recul et l'influence des caractères agronomiques des sols est telle qu'une utilisation généralisée des valeurs de certains paramètres peut conduire à une interprétation irréaliste. On peut rappeler cependant que les niveaux d'activité dus aux transferts indirects des radionucléides à vie longue et moyenne devraient être d'environ deux ordres de grandeur inférieurs à ceux dus aux transferts directs, pour la 1^{ère} année.

Les données limitées dont on a pu disposer ne permettaient pas de prendre en compte l'impact des productions destinées à des consommations différées (longue conservation).

8.2.1. Produits animaux

8.2.1.1. Lait

8.2.1.1.1. Iode 131

Le tableau 8-5 donne l'interprétation des résultats de mesure de l'Iode 131 sur le lait de vache et les conséquences sanitaires dues à son ingestion (0,3 litre par jour pour l'adulte et 0,7 litre pour l'enfant). Les résultats concernent les environnements de quatre centres où la production laitière destinée à l'homme peut être considérée comme significative ainsi qu'un lait de grand mélange distribué dans la Région Parisienne. Les périodes de décroissance effectives du lait déterminées graphiquement sont variables de 2,2 j à 4 j. Par rapport à la période attendue de 5,1 jours, ces écarts peuvent être attribués à des stades végétatifs différents pour les pâtures selon les régions, et à leur évolution plus ou moins rapide au moment de l'accident.

Dans le calcul des activités intégrées nécessaires à l'interprétation, on a utilisé une intégration graphique avec interpolation, si nécessaire, suivie dans certains cas d'une intégration mathématique, avec une période effective de décroissance mesurée sur le lait ou sur l'herbe (quand on ne disposait pas de mesures directes sur le lait).

Le Centre de CADARACHE a effectué un suivi de l'évolution de l'activité du lait de chèvre d'une exploitation, du 2 au 23 mai 1986. Les résultats observés et les interprétations sont présentés au tableau 8.7. Les valeurs relativement élevées traduisent un phénomène connu, imputable à un métabolisme différent et à des modes d'alimentation particuliers : les caprins coupent l'herbe plus à la base que les bovins, et mangent également des feuilles d'arbustes dont le pouvoir de captation peut être élevé pour certaines espèces. Les interprétations sanitaires ont été faites avec les hypothèses simplificatrices suivantes :

* On rappelle que ces données ne prennent pas en considération l'exposition interne due aux descendants du radon et du thoron.

- il faut cinq litres de lait pour faire un kilogramme de fromage,
- le temps d'affinage est de un mois,
- la totalité de l'activité de l'iode se retrouve dans le caillé,
- la consommation quotidienne retenue chez l'adulte est de 0,3 litre de lait et 50 grammes de fromage.

On peut considérer que la consommation de lait de chèvre concerne un individu ou un groupe critique, tandis que la consommation du fromage concerne la population en général.

8.2.1.1.2. Césium 137

Le tableau 8-6 présente les résultats relatifs au Césium 137 (lait de vache).

Pour l'environnement des Centres de LA HAGUE et de VALDUC, où on ne disposait pas de suivi de mesures mais où la production de lait de vache est significative sur le plan économique, les activités intégrées en Bq.j.l⁻¹ ont été estimées à partir des mesures faites sur l'herbe de pâture (avec une consommation estimée à 30 kg par jour et en utilisant les paramètres de transfert "fourrage → lait").

En ce qui concerne le lait de chèvre suivi par le Centre de CADARACHE, on a utilisé un facteur de transfert technologique $\frac{^{137}\text{Cs/gramme de fromage}}{^{137}\text{Cs/gramme de lait brut}}$ de 0,86. Ces résultats sont présentés avec ceux de l'iode 131 au Tableau 8-7.

8.2.1.2. Viande

Le Groupe CEA n'a pas fait d'analyse sur des prélèvements de viande bovine produite sur le territoire métropolitain. C'est donc un ordre de grandeur des niveaux (activité intégrée en Bq.j.kg⁻¹) qui est estimé à partir des activités mesurées sur l'herbe de pâture (en utilisant une consommation de 30 kg de fourrage par jour et les paramètres de transfert "fourrage → viande"). Les résultats sont présentés au tableau 8-8 avec les interprétations sanitaires correspondantes pour l'iode 131 et le Césium 137.

On a considéré chez l'adulte une consommation quotidienne de 150 g, et un délai de 8 jours entre l'abattage et la consommation pour les données relatives à l'iode 131.

8.2.2. Produits végétaux

Sont concernés dans cette interprétation les légumes feuilles (salade, épinard, chou) productions maraîchères continues considérées comme les espèces les plus sensibles aux retombées directes du nuage. Il faut souligner qu'en raison des dispersions importantes observables sur ces types de prélèvements, les interprétations conduisent plutôt à déterminer un ordre de grandeur pour ce vecteur de la chaîne alimentaire.

Deux approches ont été utilisées pour estimer les activités intégrées en Bq.j.kg⁻¹ :

- intégration graphique avec interpolation si nécessaire pour les séries de résultats (légumes feuilles, même lieu, plusieurs mesures consécutives) complétée par une intégration mathématique à partir de la dernière valeur en utilisant une période d'élimination physique et biologique de 30 jours,
- intégration mathématique utilisant cette même période d'élimination pour les prélèvements uniques mesurés après le passage du panache.

Les résultats sont présentés au tableau 8-9 pour une consommation quotidienne de 300 g de légumes non lavés.

8.3. DISCUSSION

Les mesures pratiques dans les centres du C.E.A. ont pour but d'estimer les niveaux de radio-activité autour des installations, la nature des radionucléides variant suivant les types d'activité des centres.

Cette surveillance n'est donc pas adaptée à une situation de type Tchernobyl. On a cependant cherché à utiliser les résultats pour apprécier les conséquences sanitaires de l'accident, les estimations présentées dans ce rapport sont très partielles et ne prétendent qu'à donner un ordre de grandeur vis à vis des situations locales qui ont pu réellement exister. Ceci résulte à la fois des caractéristiques des mesures et des interprétations.

8.3.1. Mesures

- Les mesures de dépôts n'ont pas été systématiquement associées aux mesures atmosphériques ni aux conditions météorologiques observées (pluviométrie, vitesse du vent). Une seule mesure a été faite sur le sol nu (CADARACHE), les autres ont été basées sur des mesures de couverture végétale, ce qui nécessite l'utilisation d'un facteur de captation.
- La nature des radionucléides mesurés a été diverse suivant les sites.
- Le CEA n'ayant aucune responsabilité dans la surveillance de la chaîne alimentaire, on a fait des estimations en les complétant par les résultats de mesures très ponctuelles.

Néanmoins les différentes mesures effectuées au CEA se sont montrées en accord avec celles du S.C.P.R.I. et nous remercions le Professeur P. Pellerin de nous avoir communiqué les résultats de ses analyses dans le milieu physique et sur des échantillons biologiques.

En ce qui concerne les mesures dans le milieu physique, les figures 7.6 à 7.11, montrent pour le paramètre contamination dans l'air l'évolution mesurée les 30 avril, 1^{er} mai et le reflux à partir du 2 mai (voir rapport SCPRI (RM) - VI/1986).

8.3.2. Interprétations

Des approximations et des simplifications se sont imposées :

- les iodes particuliers et les iodes piégés sur charbon actif, ont été considérés comme étant en proportion identique sur tous les points de mesures,
- les estimations des dépôts à partir des concentrations atmosphériques intégrées n'ont pas tenu compte de certains paramètres fondamentaux (intensité de la pluie, granulométrie des aérosols) ; lorsque les dépôts ont été estimés à partir des couvertures végétales, le facteur de captation utilisé est un compromis entre les facteurs habituellement utilisés par temps sec et par temps de pluie ;
- pour les produits carnés il n'y a aucune mesure et l'interprétation n'est basée que sur des estimations ;
- les vecteurs alimentaires considérés sont en nombre très réduit, ce qui a entraîné une adaptation dans les données relatives au régime pour évaluer les quantités ingérées,
- les facteurs de transfert technologique liés aux transformations des produits alimentaires n'ont pas été adaptés aux conditions locales.

8.4. CONCLUSION

Avec les réserves qui viennent d'être faites, on peut toutefois essayer de présenter une synthèse des différentes voies d'atteinte analysées. Pour ce faire, on a considéré les situations locales de cinq centres représentatifs de l'implantation en France des installations du CEA et pour lesquels on disposait de résultats de mesure utilisables pour effectuer des estimations sanitaires dans une situation de type Tchernobyl :

*LA HAGUE
SACLAY
VALDUC *
GRENOBLE
CADARACHE*

*NORMANDIE
ILE de FRANCE
BOURGOGNE
DAUPHINE
PROVENCE*

pour lesquels on a retenu :

- les conséquences de l'exposition au milieu physique (exposition au nuage, inhalation, exposition au dépôt sur un an),
- les conséquences dues à l'ingestion des composants de la chaîne alimentaire dont la production dans l'environnement des Centres est significative.

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau 8-10.

En admettant que les hypothèses utilisées et les estimations qui en découlent soient les plus réalistes possible, des différences géographiques apparaissent de façon significative ; elles sont vraisemblablement liées aux trajectoires et aux conditions météorologiques existantes pendant le passage du nuage sur les lieux de prélèvement.

8.5. Conséquences en France.

En l'absence de données précises sur l'hétérogénéité des niveaux de contamination en Cs 137 du fourrage qui servira à l'alimentation des animaux pendant l'hiver 1986-1987, il est difficile d'estimer les doses supplémentaires dues à l'ingestion de lait ou de viande.

On peut cependant tirer dès aujourd'hui des conclusions valables à partir des résultats actuellement disponibles.

- Doses à la thyroïde. Celles-ci expriment le risque lié à l'atteinte de la fonction de l'organe et non à l'induction de cancers mortels.

Pour la population générale la CIPR a défini un seuil qui tient compte des différentes classes d'âge et des sensibilités individuelles. Celui-ci est de 250 rem. Pour des raisons pratiques, on en a déduit une limite annuelle de 5 rem qui n'est qu'une valeur moyenne.

Quelqu'ait pu être l'importance des retombées locales, ce seuil de 250 rem n'a pas été atteint en France.

- Induction de Cancers. La relation dose-effet linéaire sans seuil a été établie pour les besoins de la prévention radiologique. Les hypothèses qui sont à la base du calcul surestiment considérablement le risque. On ne possède en outre aucune donnée humaine pour un aussi faible niveau de dose. S'il devait y avoir des cancers induits, ce dont on n'est pas certain aujourd'hui, leur nombre devrait être compris entre zéro et une quarantaine, valeur qu'il faut comparer avec les dix millions de cancers mortels spontanés qui apparaîtront dans la population française sur 50 ans.

* Ce sont les mesures faites à DIJON qui ont été associées au Centre de VALDUC.

En outre les mesures effectuées pour suivre l'évolution de la contamination interne corporelle des agents du C.E.A. mettent en évidence des valeurs beaucoup plus faibles (5 à 10 fois) que celles qu'avaient laissés prévoir les paramètres des modèles de transfert utilisés.

On a relevée les résultats suivants (corps entier)

- La Hague 100 Bq
- Centres de la région parisienne : 200 Bq
- Pierrelatte, Marcoule, Cadarache : 350 Bq
- Valduc : 350 Bq
- Grenoble : 550 Bq.

Ces résultats montrent cependant une corrélation entre les activités moyennes mesurées et les niveaux des retombées régionales en France. Ils doivent être comparés aux 4500 Bq de Potassium 40 naturel, homologue chimique du Cesium, qui est présent chez tous les êtres humains.

°°

TABEAU 8-1
EXPOSITION EXTERNE AU PANACHE ET INTERNE PAR INHALATION EN
EQUIVALENT DE DOSE EFFICACE (Sv)

Sites ou Stations	Grenoble	Marcoile	La Hague	Saclay	Cadarache	Orsay	Verdun	Le Ripault	Dijon	Le Barp (CESTA)	Pierrelatte	Bruyères le Châtel
Dates des mesures	1 au 11/5	29/4 au 4/5	2/5	1 au 10/5	1 au 10/5	29/4 au 9/5	29/4 au 3/5 4 au 9/5	1 au 2/5	26/4 au 10/5	26/4 au 10/5	1/5	1/5
Durée des mesures (jour)	11	6	1	10	10	11	10	2	15	20	1	1
Equivalent de dose panache (Sv) * sans correction (1) avec correction (2) mrem	3,9.10 ⁻⁸ 1,4.10 ⁻⁸ 0,001	2,9.10 ⁻⁷ 1,0.10 ⁻⁷ 0,01	4,5.10 ⁻⁸ 1,6.10 ⁻⁸ 0,002	1,3.10 ⁻⁷ 4,7.10 ⁻⁸ 0,005	2,4.10 ⁻⁷ 8,6.10 ⁻⁸ 0,009	3,3.10 ⁻⁷ 1,2.10 ⁻⁷ 0,012	5,7.10 ⁻⁷ 2,1.10 ⁻⁷ 0,021	2,9.10 ⁻⁸ 1,0.10 ⁻⁸ 0,001	2,0.10 ⁻⁷ 7,2.10 ⁻⁸ 0,007	8,6.10 ⁻⁸ 3,1.10 ⁻⁸ 0,003	3,4.10 ⁻⁸ 1,2.10 ⁻⁸ 0,001	6,0.10 ⁻⁸ 2,2.10 ⁻⁸ 0,002
Equivalent de dose engagé par inhalation (Sv) * sans correction (1) avec correction (2) mrem	3,7.10 ⁻⁶ 1,3.10 ⁻⁶ 0,13	2,2.10 ⁻⁵ 7,9.10 ⁻⁶ 0,79	1,7.10 ⁻⁶ 6,1.10 ⁻⁷ 0,061	1,4.10 ⁻⁵ 5,0.10 ⁻⁶ 0,5	8,7.10 ⁻⁶ 3,1.10 ⁻⁶ 0,31	1,7.10 ⁻⁵ 6,1.10 ⁻⁶ 0,61	3,0.10 ⁻⁵ 1,1.10 ⁻⁵ 1,1	1,5.10 ⁻⁶ 5,4.10 ⁻⁷ 0,054	1,0.10 ⁻⁵ 3,6.10 ⁻⁶ 0,36	4,0.10 ⁻⁶ 1,4.10 ⁻⁶ 0,14	3,9.10 ⁻⁶ 1,4.10 ⁻⁶ 0,14	2,5.10 ⁻⁶ 9,0.10 ⁻⁷ 0,09

* On a pris en compte toutes les formes physico-chimiques de l'iode 131 pour les sites où seul l'iode particulaire atmosphérique avait été mesuré comme indiqué au paragraphe 8.1.1.

(1) présence permanente à l'extérieur sans aucune correction.

(2) 20 % du temps à l'extérieur sans correction et 80 % du temps à l'intérieur avec un facteur de correction de 0,2 apporté par l'habitation.

TABEAU 8-2

**EXPOSITION INTERNE PAR INHALATION EN ÉQUIVALENT DE DOSE ENGAGE THYROÏDE
(TOUS RADIONUCLÉIDES MESURES) POUR UN ADULTE (Sv)**

Sites ou Stations	Grenoble	Marcoule	La Hague	Saclay	Cadarache	Orsay	Verdun	Le Ripault	Dijon	Le Barp (CESTA)	Pierrelatte	Bruyères le Châtel
Dates des mesures	1 au 11/5	29/4 au 4/5	2/5	1 au 10/5	1 au 10/5	29/4 au 9/5	29/4 au 3/5 4 au 9/5	1 au 2/5	26/4 au 10/5	26/4 au 10/5	1/5	1/5
Durée des mesures (jour)	11	6	1	10	10	11	10	2	15	20	1	1
Equivalent de dose engagé thyroïde par inhalation (Sv) *												
sans correction (1)	7,3.10 ⁻⁵	2,9.10 ⁻⁴	4,6.10 ⁻⁵	1,9.10 ⁻⁴	2,1.10 ⁻⁴	3,2.10 ⁻⁴	5,5.10 ⁻⁴	4,1.10 ⁻⁵	1,6.10 ⁻⁴	5,5.10 ⁻⁵	7,2.10 ⁻⁵	6,5.10 ⁻⁵
avec correction (2)	2,6.10 ⁻⁵	1,0.10 ⁻⁴	1,7.10 ⁻⁵	6,8.10 ⁻⁵	7,6.10 ⁻⁵	1,2.10 ⁻⁴	2,0.10 ⁻⁴	1,5.10 ⁻⁵	5,8.10 ⁻⁵	2,0.10 ⁻⁵	2,6.10 ⁻⁵	2,3.10 ⁻⁵

Equivalent de dose engagé thyroïde par inhalation (2) * (mrem)	3	10	2	7	8	12	20	2	6	2	3	2
--	---	----	---	---	---	----	----	---	---	---	---	---

* On a pris en compte toutes les formes physico-chimiques de l'iode 131 pour les sites où seul l'iode particulaire atmosphérique avait été mesuré comme indiqué au paragraphe 8.1.1.

(1) présence permanente à l'extérieur sans aucune correction

(2) 20 % du temps à l'extérieur sans correction et 80 % du temps à l'intérieur avec un facteur de correction de 0,2 apporté par l'habitation.

TABEAU 8-3
EXPOSITION EXTERNE AUX DEPOTS PENDANT UN AN
EN EQUIVALENT DE DOSE EFFICACE (Sv)

Sites ou Stations	Grenoble	Marcoule	La Hague	Saclay	Cadarache	Orsay	Verdun	Le Ripault	Dijon	Le Barp (CESTA)	Pierrelatte	Bruyères le Châtel
Equivalent de dose due aux dépôts (Sv en 1 an) :												
sans correction (1)	3,7.10 ⁻⁵	9,3.10 ⁻⁴	2,9.10 ⁻⁶	3,2.10 ⁻⁵	1,5.10 ⁻⁴	8.10 ⁻⁵	1,7.10 ⁻³	9,8.10 ⁻⁶	6,1.10 ⁻⁴	2,2.10 ⁻⁴	5,2.10 ⁻⁴	2,2.10 ⁻⁵
avec correction (2)	8,9.10 ⁻⁶	2,2.10 ⁻⁴	7,0.10 ⁻⁷	7,7.10 ⁻⁶	3,6.10 ⁻⁵	1,9.10 ⁻⁵	4,1.10 ⁻⁴	2,4.10 ⁻⁶	1,5.10 ⁻⁴	5,3.10 ⁻⁵	1,3.10 ⁻⁴	5,3.10 ⁻⁶
Equivalent de dose due aux dépôts (mrem en 1 an) avec correction (2)	0,9	22	0,07	0,8	4	2	41	0,2	15	5	13	0,5

(1) présence permanente à l'extérieur sans aucune correction pendant 1 an.

(2) 20 % du temps à l'extérieur sans correction et 80 % du temps à l'intérieur avec un facteur de correction de 0,05 apporté par l'habitation.

☐ à partir de mesures de dépôts.

TABLEAU 8-4

RECAPITULATION DE L'EXPOSITION AU MILIEU PHYSIQUE EN EQUIVALENT DE DOSE EFFICACE
(EXPOSITION EXTERNE AU PANACHE + INTERNE PAR INHALATION + EXTERNE AUX DEPÔTS
BILAN DE LA PREMIERE ANNEE APRES L'ACCIDENT (Sv)

Sites ou Stations	Grenoble	Marcoule	La Hague	Sadlay	Cadarache	Orsay	Verdun	Le Ripault	Dijon	Le Barp (GESTA)	Pierrelatte	Bruyères le Châtel
Equivalent de dose efficace total (1) Sv	1,1.10 ⁻⁵	2,3.10 ⁻⁴	1,3.10 ⁻⁶	1,3.10 ⁻⁵	3,9.10 ⁻⁵	2,5.10 ⁻⁵	4,2.10 ⁻⁴	3,0.10 ⁻⁶	1,5.10 ⁻⁴	5,4.10 ⁻⁵	1,3.10 ⁻⁴	6,2.10 ⁻⁶
mrem	1	23	0,1	1	4	3	42	0,3	15	5	13	0,6

(1) avec les facteurs de correction mentionnés dans le texte et dans les tableaux 8-1 et 8-3

☐ à partir des mesures.

Equivalent de dose efficace du à l'exposition externe naturelle : Sv	4,6.10 ⁻⁴	5,7.10 ⁻⁴	non mesuré	5,1.10 ⁻⁴	4,3.10 ⁻⁴	5,1.10 ⁻⁴	7,3.10 ⁻⁴	6,0.10 ⁻⁴	5,0.10 ⁻⁴	5,5.10 ⁻⁴	5,7.10 ⁻⁴	5,1.10 ⁻⁴
mrem	46	57	-	51	43	51	73	60	50	55	57	51

* Pour l'exposition naturelle dans le département de la Meuse (Verdun) non mesurée, on a utilisé la moyenne d'un département voisin, la Moselle.

TABLEAU 8-5

INTERPRETATION DES RESULTATS DE MESURE DE L'ODE 131 SUR LE LAIT DE VACHE
ESTIMATION DES CONSEQUENCES SANITAIRES DUES A L'INGESTION (Sv)

	LA HAGUE	SACLAY	VALDUC	GRENOBLE	LAIT REGION PARISIENNE
Valeur maximale Bq. l ⁻¹	52	60	480	233	52
Nombre de prélève- ments mesurés	3	4	9	6	15
Méthode de calcul Période effective utilisée (T)	* T = 2,2 j observée graphiquement	*** T = 3,5 j observée graphiquement	* T = 4 j observée graphiquement	** T = 2,5 j observée graphiquement	*** T = 4 j observée graphiquement
Activité intégrée Bq. j l ⁻¹	165	300	2 560	990	460
Equivalent de dose engagé efficace adulte Sv	7,1.10 ⁻⁷	1,3.10 ⁻⁶	1,1.10 ⁻⁵	4,2.10 ⁻⁶	2,0.10 ⁻⁶
Equivalent de dose engagé à la thyroïde adulte Sv	2,3.10 ⁻⁵	4,2.10 ⁻⁵	3,6.10 ⁻⁴	1,4.10 ⁻⁴	6,5.10 ⁻⁵
Equivalent de dose engagé à la thyroïde enfant Sv	4,3.10 ⁻⁴	7,8.10 ⁻⁴	6,6.10 ⁻³	2,6.10 ⁻³	1,2.10 ⁻³

* Intégration mathématique
** Intégration graphique
*** Intégration graphique + intégration mathématique.

TABEAU 8-6

INTERPRETATION DES RESULTATS DES NIVEAUX D'ACTIVITE DE CESIUM 137 SUR LE LAIT DE VACHE
ESTIMATION DES CONSEQUENCES SANITAIRES DUES A L'INGESTION (Sv)

	LA HAGUE	SACLAY	VALDUC	GRENOBLE	LAIT REGION PARISIENNE
Valeur maximale Bq. l ⁻¹	-	13	-	180	13
Nombre de prélèvements mesurés	-	6	-	14	13
Méthode de calcul Période effective utilisée (T)		* T = 13,5 j observée graphiquement		* T = 11,4 j observée graphiquement	* T = 30 j théorique
Activité intégrée Bq. j l ⁻¹	70 (**)	305	225 (**)	2780	285
Equivalent de dose engagé efficace adulte Sv	2,8.10 ⁻⁷	1,2.10 ⁻⁶	9,1.10 ⁻⁷	1,1.10 ⁻⁵	1,2.10 ⁻⁶

* Intégration graphique + intégration mathématique

(**) L'activité intégrée en Bq. l⁻¹ a été estimée à partir des mesures faites sur l'herbe de pâture.

TABEAU 8-7
INTERPRETATION DES RESULTATS DE MESURE DE L'IODE 131
ET DU CESIUM 137 SUR UN LAIT DE CHEVRE (Environnement de CADARACHE) *
CONSEQUENCES SANITAIRES POUR L'ADULTE (Sv)

	IODE 131	CESIUM 137
LAIT Valeur maximale Bq. l ⁻¹	2 000	74
Nombre de prélèvements mesurés	18	18
Méthode de calcul Période effective utilisée (T)	Intégration graphique T = 4,5 j Déterminée graphiquement	Intégration mathématique T = 14,2 j Déterminée graphiquement
Activité intégrée dans le lait Bq. j. l ⁻¹	11 800	1 330
Activité intégrée pour le fromage Bq. j. kg ⁻¹	4 400	1 145
Equivalent de dose engagé efficace Sv	Lait	5,4.10 ⁻⁶
	Fromage	7,1.10 ⁻⁷
Equivalent de dose engagé thyroïde Sv	Lait	-
	Fromage	-

* Voir hypothèse dans le texte.

TABEAU 8-8

ESTIMATION DES NIVEAUX D'ACTIVITE DE L'IODE 131 ET DU CESIUM 137

DANS LA VIANDE BOVINE A PARTIR DES MESURES D'ACTIVITE FAITES SUR L'HERBE DE PATURE

ESTIMATION DES CONSEQUENCES SANITAIRES DUES A L'INGESTION (Sv)

		LA HAGUE	SACLAY	VALDUC
Activité intégrée Bq. j. kg ⁻¹	¹³¹ I (*)	680	2 425	5 135
	¹³⁷ Cs	205	1 740	640
Equivalent de dose engagé efficace adulte (Sv)	¹³¹ I (*)	1,5.10 ⁻⁶	5,2.10 ⁻⁶	1,1.10 ⁻⁵
	¹³⁷ Cs	4,2.10 ⁻⁷	3,5.10 ⁻⁶	1,3.10 ⁻⁶
Equivalent de dose engagé thyroïde adulte (Sv)	¹³¹ I (*)	4,8.10 ⁻⁵	1,7.10 ⁻⁴	3,6.10 ⁻⁴

(*) Les valeurs relatives à l'iode 131 ont été calculées avec un délai de 8 jours entre l'abattage et la consommation.

TABLEAU 8-9
NIVEAU D'ACTIVITE DANS LES LEGUMES FEUILLES
ESTIMATION DES CONSEQUENCES SANITAIRES DUES A L'INGESTION (Sv)

		131 I	137 Cs	134 Cs	103 Ru	132 Te	140 Ba	106 Ru
CADARACHE 15 prélèvements	Valeur maximale Bq. kg ⁻¹	740	120	61	170	150	NM	NM
	Activité intégrée Bq. j. kg ⁻¹	5 200	1 640	920	1 380	450	-	-
	Conséquences sanitaires	Equivalent de dose efficace engagé en Sv : 3,5.10 ⁻⁵ Equivalent de dose engagé thyroïde en Sv : 7,6.10 ⁻⁴						
LA HAGUE 4 prélèvements	Valeur maximale Bq. kg ⁻¹	6	3	2	2	NM	NM	NM
	Activité intégrée Bq. j. kg ⁻¹	17	30	18	11	-	-	-
	Conséquences sanitaires	Equivalent de dose efficace en Sv : 3,0.10 ⁻⁷ Equivalent de dose engagé thyroïde en Sv : 2,6.10 ⁻⁶						
NICE 1 prélèvement	Valeur maximale Bq. kg ⁻¹	150	287	147	342	NM	123	52
	Activité intégrée Bq. j. kg ⁻¹	1 350	7 495	3 840	6 750	-	1 520	1 315
	Conséquences sanitaires	Equivalent de dose efficace engagé en Sv : 6,3.10 ⁻⁵ Equivalent de dose engagé thyroïde en Sv : 2,4.10 ⁻⁴						

TABLEAU 8-10

RECAPITULATION DES CONSEQUENCES SANITAIRES DES DIFFERENTES VOIES D'ATTEINTE POUR L'ADULTE
EQUIVALENT DE DOSE EFFICACE EN Sv :
BILAN POUR LA PREMIERE ANNEE APRES LE PASSAGE DU NUAGE

	NORMANDIE (La Hague)	ILE DE FRANCE (Saclay)	BOURGOGNE (Valduc)	DAUPHINE (Grenoble)	PROVENCE (Cadarache)
Milieu physique (1) (2)					
- Panache	1,6.10 ⁻⁸	4,7.10 ⁻⁸	7,2.10 ⁻⁸	1,4.10 ⁻⁸	8,6.10 ⁻⁸
- Inhalation	6,1.10 ⁻⁷	5,0.10 ⁻⁶	3,6.10 ⁻⁶	1,3.10 ⁻⁶	3,1.10 ⁻⁶
- Dépôt	7,0.10 ⁻⁷	7,7.10 ⁻⁶	1,5.10 ⁻⁴	8,9.10 ⁻⁶	3,6.10 ⁻⁵
Somme	1,3.10 ⁻⁶	1,3.10 ⁻⁵	1,5.10 ⁻⁴	1,0.10 ⁻⁵	3,9.10 ⁻⁵
Chaine alimentaire					
- Lait de vache	1,0.10 ⁻⁶	3,2.10 ⁻⁶ (3)	1,1.10 ⁻⁵	1,5.10 ⁻⁵	-
- Viande bovine	1,9.10 ⁻⁶	8,7.10 ⁻⁶	1,1.10 ⁻⁵	-	-
- Légumes feuilles	3,0.10 ⁻⁷	-	-	-	3,5.10 ⁻⁵
- Fromage de chèvre ...	-	-	-	-	4,0.10 ⁻⁶
Somme	3,2.10 ⁻⁶	1,2.10 ⁻⁵	2,3.10 ⁻⁵	1,5.10 ⁻⁵	3,9.10 ⁻⁵
TOTAL DES VOIES D'ATTEINTE	4,5.10 ⁻⁶ (0,5 mrem)	2,5.10 ⁻⁵ (2,5 mrem)	1,7.10 ⁻⁴ (17 mrem)	2,5.10 ⁻⁵ (2,5 mrem)	7,8.10 ⁻⁵ (8 mrem)

(1) Avec les facteurs de correction mentionnés dans le texte
(2) Ce sont les résultats observés à DIJON qui ont été appliqués à VALDUC
(3) On a considéré le lait de grande consommation de la REGION PARISIENNE.

RADIOACTIVITE NATURELLE

Débit de dose moyen dans l'air par département
dû aux rayonnements gamma (10^{-8} Gy.h⁻¹)
(mesures IPSN)



FIGURE 8-1.

9. – PROBLEMES MEDICAUX ET SANITAIRES IMMEDIATS EN UNION SOVIETIQUE

Deux types de population auraient pu recevoir des doses à des niveaux élevés, pouvant entraîner des conséquences pathologiques à court ou moyen terme. Ce sont : d'une part les populations des bourgs et villages proches de la Centrale et sous le vent, qui, en l'absence de mesure de protection, auraient été exposées à des doses élevées ; d'autre part les ouvriers de la Centrale présents au moment de l'accident, ainsi que tous les intervenants des premières heures, tels que sauveteurs et pompiers.

Les premiers étaient en très grand nombre, mais les doses reçues ne posaient aucun problème médical immédiat ; aucun individu de la population n'a présenté de signes justifiant l'hospitalisation. Parmi les seconds, au nombre de plusieurs centaines, certains ont reçu des doses très élevées, nécessitant des soins intensifs dans un service hospitalier spécialisé. Les deux premières victimes ont été dues à l'explosion de très grande puissance ; un ouvrier a été écrasé par les structures de la Centrale et un autre a été brûlé très grièvement et est décédé rapidement.

9.1. Problèmes médicaux

Les autorités soviétiques ont rapidement décidé de transférer les irradiés les plus gravement atteints à l'hôpital n° 6 de Moscou, sous la responsabilité du *Dr Angelina Gouskova*, dont la compétence dans le domaine de la radiopathologie est reconnue dans le monde scientifique. Sur les 299 personnes hospitalisées, les choix thérapeutiques étaient d'autant plus difficiles que l'estimation des doses reçues s'est avérée malaisée. En effet, étant données les circonstances de l'accident, toute reconstitution individuelle était impossible et les irradiés à très fortes doses avaient déjà, lors de leur arrivée à Moscou, des taux lymphocytaires quasi nuls.

Le tri initial s'est effectué sur des notions simples : temps d'apparition et intensité des premiers signes cliniques (vomissements, diarrhée, érythème) et hématologiques (lymphopénie). Ce tri a permis de définir quatre grandes classes :

- irradiés ne justifiant qu'une surveillance hématologique, avec des doses entre 1 et 2 Gy,
- irradiés justifiant une surveillance médicale stricte, avec des doses entre 2 et 4 Gy,
- irradiés à des doses létales ou supralétales, entre 4 et 8 Gy, nécessitant une réanimation lourde,
- irradiés à des doses en principe en dehors de toute ressource thérapeutique, au-dessus de 8 Gy.

L'estimation des doses s'est naturellement affinée avec le développement de la symptomatologie.

Sur les 203 personnes avec des doses élevées, 22 ont reçu entre 8 et 16 Gy, 23 entre 4 et 8 Gy, 53 entre 2 et 4 Gy et 105 entre 1 et 2 Gy. Les irradiations globales reçues lors des opérations menées pour éviter l'extension de l'accident ne furent pas isolées : chez de nombreux individus, elles s'accompagnaient de brûlures thermiques (6 cas) et radiologiques (45 cas).

Les médecins soviétiques ont eu aussi à faire face à des brûlures radiologiques graves, dues essentiellement au dépôt d'émetteurs beta sur les individus, dont la décontamination s'est avérée quasi impossible. Elles ont constitué le problème principal. Ainsi 8 victimes, toutes décédées, ont été brûlées à plus de 60 % et 12 entre 30 et 60 % avec 9 issues fatales.

Le tableau 9-1 met en évidence la gravité des brûlures. De plus, plusieurs victimes irradiées à haut niveau ont présenté une pneumonie de surinfection avec problèmes ventilatoires graves, incompatibles avec une survie prolongée.

Avec l'aide du *Dr Robert Gale*, président actuel de l'**Advisory Committee of the International Bone Marrow Transplant Registry**, mandaté par l'industriel pétrolier américain *Armand Hammer* ami de dirigeants soviétiques, les équipes hospitalières ont posé l'indication de 19 transplantations. Le typage a été dans certains cas rendu impossible par l'aplasie lymphocytaire ; c'est pourquoi, sur les 19 transplantations, 6 n'utilisèrent pas de moelle mais des foies foetaux.

Le taux de survie après transplantation s'est révélé très faible. Aucun transplanté par foie foetal n'a survécu. Il est vrai que ces patients avaient tous reçu de très fortes doses. Parmi les 13 transplantés par moelle, il ne subsistait que 4 survivants à la fin de l'été. Aucune de ces greffes n'a pris définitivement. A la fin du mois d'Août, le bilan était lourd : 31 décès et près de 200 patients encore sous traitement en milieu hospitalier. Les décès sont survenus rapidement : on annonçait 7 morts le 15 mai, 11 le 20 mai, 20 le 23 mai, 26 le 4 juin et 31 le 18 août. Les malades encore hospitalisés actuellement sont au nombre de 11 et le bilan des décès ne devrait pas s'alourdir. Le tableau 9-2 récapitule le bilan médical des sujets hospitalisés.

Les médecins soviétiques ont dû faire face à des problèmes graves, surajoutés aux conséquences habituelles d'une irradiation aiguë, dont les principaux ont été :

- les brûlures qui ont compliqué dans d'énormes proportions le pronostic de ces malades ;
- la décontamination qui a été très ardue, compliquée par les brûlures dues à cette contamination.

Les décisions thérapeutiques ont porté soit sur des transplantations soit sur des transfusions répétées de plaquettes suivant la méthode mise au point à l'Institut Curie.

Les résultats des transplantations auraient tendance à montrer le bien-fondé de l'école française qui ne considère la transplantation médullaire, en cas d'accident radiologique, que comme un geste exceptionnel qui ne doit être pratiqué qu'avec toutes les garanties fournies par les éléments du diagnostic et du pronostic. Il est cependant impossible de porter un jugement catégorique sur le bien-fondé des transplantations effectuées à Moscou puisque les doses étaient parfois au-dessus de toute ressource thérapeutique et que de nombreux cas présentaient des complications dues principalement aux brûlures associées. Les conclusions du rapport soviétique publié à la suite de l'accident sont cependant claires : (1) les victimes d'un accident nucléaire pour lesquelles une greffe de moelle est indiquée seront toujours en nombre réduit, (2) bien que la greffe puisse prendre chez de tels malades, cette prise aura toujours des effets négatifs et pourra mettre la vie du malade en danger, du fait de la réversibilité du syndrome hématopoïétique.

9.2. Problèmes sanitaires

Dès la survenue de l'évènement, le souci des autorités soviétiques a été l'évaluation de l'exposition de la population, en premier lieu des groupes proches du réacteur. La ville de **Pripyat** a été considérée en priorité, étant donné sa proximité du site de **Tchernobyl**.

Immédiatement après le début de l'accident, les 45 000 habitants de **Pripyat** ont été invités à réduire au maximum le temps passé à l'extérieur et de se confiner au mieux. Le 26 avril, toutes les activités qui entraînaient la circulation des personnes étaient supprimées (écoles, crèches, etc...), et

un traitement préventif par l'iode stable était institué. Compte tenu de ces mesures, les doses reçues par les habitants de Pripyat ont été estimées, pour les deux premiers jours, aux environs de 1,5 à 5 cGy à l'organisme entier (irradiation gamma), 10 à 20 cGy à la peau (irradiation beta) et 1,5 à 20 cGy à la thyroïde. C'est la raison pour laquelle l'évacuation de l'ensemble de la population de cette ville a été effectuée le 27 avril.

De même, les estimations de doses dans un rayon de 30 km autour de Tchernobyl ont été effectuées d'urgence, à la fois par modélisation et par mesures directes. Le tableau 9-3 montre les estimations de doses dans les principaux bourgs ou villes autour du réacteur.

Dans les premiers jours qui ont suivi le début de l'accident, 90 000 personnes, en plus des habitants de Pripyat, furent évacuées de cette zone qui correspond grossièrement à un secteur circulaire de 30 km de rayon autour de Tchernobyl. Le nombre total de personnes évacuées dans des délais courts a donc été de 135 000. Cette mesure de protection a permis de réduire les doses à des niveaux en général inférieurs à 25 cGy, à l'exception de certaines régions ayant eu des dépôts particulièrement importants où des doses individuelles ont pu atteindre 30 à 40 cGy (villages de **Tolstyj Les**, **Kopachi** entre autres). Toutes les personnes évacuées ont été médicalement examinées; 450 équipes médicales comprenant 1 240 médecins, 920 infirmiers et plus de 4 000 assistants ont été requises. Après décontamination, toutes ces personnes ont subi un examen dosimétrique et hématologique, répété quand des anomalies étaient constatées. Plus de 100 000 thyroïdes ont été mesurées, notamment chez les enfants.

Le tableau 9-4 qui combine la distribution démographique et les doses reçues, en fonction de la distance de Tchernobyl, donne une appréciation à la dose reçue par la population rapidement évacuée dans les environs du site.

Etant donné l'importance des dépôts, la population des régions proches de Tchernobyl a continué d'être exposée par la voie alimentaire. La composante principale de l'exposition pendant les deux premiers mois a été l'iode. C'est la raison pour laquelle l'effort de surveillance médicale des populations a porté essentiellement dans un premier temps sur la surveillance de la thyroïde, non seulement dans les populations évacuées mais aussi chez les habitants d'**Ukraine**, de **Biélorussie** et autres régions avoisinantes. Les enfants sont encore particulièrement surveillés puisque chez eux la dose, pour une même activité incorporée, est très supérieure à celle de l'adulte.

Les niveaux de référence institués en URSS pour la population en cas d'accident sont de 50 mSv dans l'année de l'accident pour l'organisme entier et de 150 mSv pour la thyroïde.

A partir de ces niveaux ont été définies des valeurs limites de contamination des produits de la chaîne alimentaire. Les résultats des mesures marquées sur les prélèvements ont montré que ces limites ont été souvent dépassées. Par exemple du lait recueilli dans la région de **Gomel** avait une activité de l'ordre du million de Becquerel par litre. Dans la même région, 30 % des échantillons de lait, 40 % de la viande et 90 % des poissons dépassaient les limites.

Aussi pour estimer les conséquences réelles des retombées de Tchernobyl, les soviétiques ont entrepris des campagnes de mesure de radioactivité corporelle de la population.

9.3. Effets à long terme.

En l'absence de bonnes données sur les niveaux de radiocontamination interne les Soviétiques sont restés très prudents sur l'importance éventuelle des effets à long terme.

Ils n'ont fourni d'estimation que pour l'exposition externe. Celle-ci a été détaillée pour les groupes de population vivant dans un rayon de 30 km autour de la Centrale. Pour certains de ces groupes, les niveaux de dose sont comparables à ceux pour lesquels on a déjà observé un excès de cancers dans d'autres populations humaines. Autour de Tchernobyl l'excès de décès par cancer pourrait être légèrement inférieur à 2 % du taux des cancers mortels spontanés. Le calcul est basé sur la valeur de la dose collective et sur les données du registre des cancers locaux.

Pour le reste de la Russie d'Europe, les Soviétiques n'ont fourni qu'une estimation de ce que pourrait être l'enveloppe maximale de l'excès de cancers mortels, en soulignant bien le fait que dans la gamme de doses considérée on ne possédait aujourd'hui aucune donnée humaine.

A la réunion organisée à Vienne par l'A.I.E.A. il est clairement apparu que, compte tenu des niveaux de doses et des effectifs des personnes irradiées, l'excès de cancer ne serait significatif que pour les groupes les plus exposés. Les incertitudes prévisibles laissent prévoir qu'une enquête épidémiologique n'améliorerait pratiquement pas la précision des estimations de risques actuelles.

9.4. Environnement.

Les dépôts autour de la Centrale posent deux problèmes différents. La contamination des sols est extrêmement hétérogène. De ce fait il sera nécessaire d'attendre au moins une année avant que ne se stabilise la situation radiologique. Celle-ci évolue actuellement par suite de la remise en suspension des particules radioactives qui s'étaient déposées. Ce n'est donc qu'en 1987 que pourraient être prises les décisions qui permettront la décontamination définitive des bâtiments et la réutilisation des sols.

Aujourd'hui les niveaux de dose mesurés sont tels que l'on observera en quelques points des modifications des équilibres écologiques existants.

En d'autres zones, la réutilisation des terres cultivées ne pourra se faire qu'en changeant la nature des productions agricoles ou en modifiant les méthodes de culture.

Il n'est, néanmoins, pas question aujourd'hui d'interdire la présence humaine dans certaines zones autour de Tchernobyl. Les délais de réimplantation ne devraient pas dépasser quelques années.

TABLEAU 9-1

Bilan des brûlés de Tchernobyl

surface corporelle brûlée	nombre de brûlés	mortalité
< 30 %	21	0
30 - 60 %	12	9
60 - 90 %	8	8

TABLEAU 9-2

Bilan médical des sujets hospitalisés

Dose (Gy)	Sujets hospitalisés				Mortalité	
	Kiev	+	Moscou	= Total	nombre	%
1 - 2	74	+	31	105	0	< 1
2 - 4	10	+	43	53	1	2
4 - 8	2	+	21	23	7	30
8 - 16	2	+	20	22	21	98
				203	29 *	

* A ces 29 victimes, il convient, pour exprimer le nombre total de morts causées par l'accident, d'ajouter les 2 victimes du premier jour par brûlures et polytraumatismes.

TABLEAU 9-3

**Estimation des doses à la population
autour du réacteur de Tchernobyl**

Distance (km) à la Centrale	Dose (rem) en 1 semaine	Dose (rem) en 1 mois
3 - 7	6 - 80	10 - 130
7 - 10	10 - 60	16 - 100
10 - 15	1,2 - 75	2 - 120
15 - 20	0,3 - 25	0,5 - 40
20 - 25	0,4 - 35	0,6 - 60
25 - 30	0,1 - 12	0,2 - 20

Ces doses tiennent compte du mode de vie et de la protection apportée par les habitants. L'incertitude sur les doses est due au fait que, dans une même couronne, les zones ont été inégalement concernées pour les différentes phases du rejet.

TABLEAU 9-4

**Evaluation calculée de la dose collective
des populations évacuées
(exposition externe)**

Distance du réacteur (km)	Taille de la population	Dose collective (homme rem)	Dose moyenne (rem)
Pripyat	45 000	150 000	3
3 - 7	7 000	380 000	54
7 - 10	9 000	410 000	45
10 - 15	8 200	290 000	35
15 - 20	11 600	60 000	5
20 - 25	14 900	90 000	6
25 - 30	39 200	180 000	5
	135 000	1 600 000	12

A N N E X E

Rappel sur les unités utilisées dans le rapport

Tout individu soumis à une exposition externe ou interne (inhalation ou ingestion) aux rayonnements ionisants court un risque lié aux effets biologiques de ces rayonnements. Des limites admissibles de ce risque sont exprimées sous forme de recommandations par des organismes internationaux. Les autorités nationales compétentes ont ensuite la responsabilité de les adapter sous forme de réglementation.

- L'activité d'une quantité de radionucléides est égale au quotient du nombre de transformations nucléaires spontanées qui se produisent dans cette quantité par l'intervalle de temps considéré.

Le Becquerel est l'unité quantifiant une transformation nucléaire par seconde. C'est l'unité du système international.

Le Curie est l'unité quantifiant $3,7 \cdot 10^{10}$ transformations nucléaires par seconde. C'est le nombre de transformations nucléaires dans un gramme de radium pendant une seconde.

- Dans un milieu irradié, la dose absorbée est égale au quotient de l'énergie cédée au milieu par le rayonnement, par la masse du milieu.

Le Gray est l'unité quantifiant la cession par le rayonnement d'un Joule par kg de matière du milieu, soit $6,25 \cdot 10^{18}$ électron-Volt par kg de matière.

Le rad est l'unité quantifiant la cession par le rayonnement d'un centijoule par kg de matière du milieu. C'est un centigray.

- Le débit de dose absorbée est égal au quotient de l'accroissement de dose par un intervalle de temps. L'unité de débit de dose est le quotient du Gray par n'importe quelle unité de temps.
- L'équivalent de dose à un organe : l'effet biologique d'un rayonnement ionisant dans une masse de tissu est directement proportionnel à la dose absorbée, mais dépend aussi d'autres facteurs, en particulier la densité de perte d'énergie, et la distribution de la dose absorbée dans l'espace et dans le temps. L'équivalent de dose est égal à la dose absorbée multipliée par le "facteur de qualité".

Le Sievert est l'unité d'équivalent de dose du système international. C'est le Gray multiplié par le facteur de qualité.

Le Rem est l'unité d'équivalent de dose égal au centisievert. C'est le rad multiplié par le facteur de qualité.

– **L'équivalent de dose efficace** est la somme pondérée de l'équivalent de dose pour chaque organe (poumon, thyroïde, moëlle rouge...) du corps humain (unité : Sievert).

– **L'équivalent de dose efficace engagé** est l'équivalent de dose efficace intégré sur une période de 50 ans résultant d'une contamination, c'est-à-dire de l'ingestion ou de l'inhalation de radionucléides (unité : Sievert).

ANNEXE

DESCRIPTION DU SITE

DE LA CENTRALE DE TCHERNOBYL

Les lignes qui suivent, visent à présenter de façon succincte les données disponibles sur l'environnement du site de **Tchernobyl**. Elles se fondent, d'une part, sur des éléments très généraux issus d'une bibliographie sommaire (cartes à l'échelle de quelques millièmes et descriptions géographiques régionales) et, d'autre part, sur une exploitation de renseignements locaux limités (photographies prises par satellites, cartes à grande échelle plus ou moins récentes qui ont pu être consultées à l'Institut Géographique National et coupures de presse). Ces données ont été complétées par des renseignements tirés du rapport soviétique sur l'accident préparé pour le meeting de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique à Vienne du 25 au 29 août 1986. Il s'agit donc, pour l'essentiel, d'une "reconstitution" et ceci marque les limites de l'étude entreprise.

1.- SITUATION GENERALE DU SITE

La centrale de **Tchernobyl** se trouve à la limite nord de l'Ukraine (pays comparable à la France par sa superficie et par sa population) près de la Biélorussie (figure A.0 et A.1).

Plus précisément, la centrale est dans l'oblast de **Kiev**, division administrative de la république d'Ukraine.

Le site s'étend au bord de la rivière Pripyat, un affluent du Dniepr, à un endroit où elle est traversée par la voie ferrée Tchernigov-Ovrutch (figures A.2 à A.7). Proche du confluent du Dniepr, la ville de **Tchernobyl**, qui a donné son nom à la centrale, est à 14 km au Sud-Est, et l'agglomération de **Kiev**, deux millions cinq cent mille habitants, en aval, au sud, à une centaine de kilomètres de distance. Par contre la ville nouvelle de **Pripyat** de création administrative récente regroupant plusieurs anciennes localités (environ 45 000 habitants) commence à 2 km environ au nord ouest du site. Vers le Nord, la frontière biélorussie est à environ 15 km.

Le site se trouve dans une région assez plate dénommée Polésie (du russe Poliessié : pays de forêts). Aussi marécageuse que forestière, celle-ci est découpée par le réseau des affluents de la rive droite de la Pripyat qui s'étend sur l'oblast de **Gomel** et sur une grande partie de celui de **Brest**.

Les coordonnées du site sont :

30 ° 06' de Longitude Est.

51 ° 23' de Latitude Nord.

La présence de la voie ferrée, la valeur médiocre des terres souvent à l'état de marais en particulier vers le Nord (le site est relativement loin des riches terres à blé d'Ukraine centrale), la proximité ainsi que l'importance démographique et économique de **Kiev** ont dû justifier l'implantation de la centrale.

2.- ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET VOIES DE COMMUNICATION

D'après les données disponibles sur l'économie de l'Ukraine, confirmées par l'examen des cartes détaillées (figures A.2 à A.4), la centrale de **Tchernobyl** n'est pas située dans la partie industrielle du pays. Les villes de **Kiev** et **Tchernigov**, qui sont dans une région à dominante agricole, sont connues pour leurs industries légères ; elles concernent surtout le matériel agricole et l'agro-alimentaire (farines, raffineries de sucre) ; le Nord de l'Ukraine est aussi réputé pour ses industries du bois. L'agriculture intensive a entraîné la production d'engrais et l'établissement d'industries chimiques qui se sont diversifiées (fibres synthétiques, plastiques, caoutchouc...).

La région étant déficitaire en sources d'énergie, la production d'électricité s'est développée à partir de tourbe, bitume, lignite, gaz de pétrole ; des usines hydroélectriques sont installées à **Kiev** et à **Kanev** et des centrales nucléaires à **Rovno** dans l'Ouest de l'Ukraine et à **Tchernobyl**. Cette dernière centrale fournit aussi de la chaleur pour le chauffage urbain des agglomérations proches.

D'après les cartes examinées, les environs du site paraissent peu industrialisés (figures A.4 à A.6) ; il est seulement fait mention d'une zone d'usines en Biélorussie, à environ 35 km au Nord-Ouest. Il y a lieu de signaler, cependant, que l'analyse de la photographie réalisée par le satellite SPOT montre tout près de la centrale, au Sud-Est de celle-ci, entre les canaux de prise et de rejet d'eau, une zone de caractère industriel avec deux aéroréfrigérants correspondant, d'après le rapport soviétique sur l'accident, aux nouvelles tranches 5 et 6 en construction (figure A.7).

Pour ce qui concerne les voies de communications terrestres, le site de **Tchernobyl** semble à l'écart des routes principales. En revanche, il est desservi par le chemin de fer à voie unique de **Tchernigov** à **Ovrutch** qui passe à environ 750 m des réacteurs (figures A.4 et A.5). Bien que donnée pour navigable et large de deux cents à trois cents mètres, la rivière Pripyat ne paraît pas supporter un trafic de navigation notable.

Il ne semble pas qu'il y ait d'aérodromes proches (figure A.2). Le site est largement à l'écart des itinéraires internationaux et l'aérodrome de **Kiev-Borispol** se trouve à environ 125 km au Sud-Sud-Est. La circulation interne à l'Union Soviétique utilise les aérodromes de **Tchernigov-est** à 85 km à l'Est-Nord-Est, de **Jitomir** à 140 km au Sud-Ouest, et de **Gomel** à une distance équivalente au Nord... La carte mentionne un petit aérodrome biélorusse à **Khutor Lesok** à environ 23 km au Nord. En Ukraine, un aérodrome de nom inconnu est à 40 km au Sud-Sud-Ouest, un autre à **Ferma** à la même distance au Sud-Ouest, celui de **Tchernigof-ouest** à 65 km ; d'autres aérodromes sont signalés aux environs de **Kiev** (environ 80 km). Un itinéraire aérien est aussi indiqué à l'Est de **Tchernobyl**.

En résumé, la centrale de **Tchernobyl** paraît localisée dans une zone plus rurale qu'industrielle, à l'écart des grands axes de communication.

3. POPULATIONS

Selon le rapport soviétique rédigé après l'accident, la centrale de **Tchernobyl** a été placée dans une zone de densité de population relativement peu élevée, 70 habitants par kilomètre carré, et 100 000 habitants se trouvaient dans un rayon de 30 km ce qui est peu compatible avec la donnée précédente. La ville nouvelle de **Pripyat** rassemblait 45 000 habitants ou selon d'autres sources 49 000 ; il y avait 5 villages jusqu'à 7 km, 4 de 7 km à 10 km, 10 entre 10 km et 15 km, 16 enfin entre 15 km et 20 km... Ces chiffres cadrent mal entre eux et avec celui de 135 000 évacuations dans la même zone.

Pour tenter de lever ces ambiguïtés, une estimation directe des populations était envisageable. A partir de photographies prises par satellites, de données disparates souvent très générales, fournies par différentes cartes et leurs notices, et également des densités rurales moyennes dans les oblasts, il est possible en effet, de réaliser une estimation approximative dans un rayon de 50 km autour du site de la centrale :

- Pour la zone proche de la centrale, soit jusqu'à 20 km, l'évaluation repose sur une interprétation des photographies prises par le satellite SPOT appuyée sur la carte au 1/50 000 (figures A.6 et A.8). Les photographies en fausses couleurs permettent le repérage des zones urbanisées et leur surface peut donc être appréciée. En supposant partout une densité égale à celle de la ville de **Tchernobyl** définie à partir de son nombre d'habitants, 12 500, une valeur du nombre d'habitants peut être estimée. Cette dernière hypothèse est, de toute évidence, imparfaite. Dans les villages ruraux, la présence de jardins doit faire diminuer la densité qui sera, à l'opposé, plus élevée dans la ville nouvelle de **Pripyat**.
- Pour la zone comprise entre 20 km et 50 km, l'évaluation est fondée sur les densités de population dans l'oblast de **Kiev** (65 hab/km²), dans l'oblast de **Tchernigov** (47,5 hab/km²), en Biélorussie (42 hab/km²) et également sur la localisation et l'importance des villes (figure A.3) qui permettent de pondérer les résultats fixés sur les densités.

Les résultats de cette estimation fournissent une image globale probablement assez "floue" des populations de la région de **Tchernobyl** mais ils soulignent aussi un certain nombre de contradictions qui apparaissent dans le rapport soviétique sur l'accident.

Quoiqu'il en soit, les points suivants paraissent établis :

- il ne semble pas y avoir de regroupement d'habitations dans les trois premiers kilomètres autour de la centrale ; ceci confirmerait l'indication constante des autorités soviétiques selon laquelle il n'y a pas d'habitant à moins de trois kilomètres des réacteurs,
- la comparaison des clichés pris par satellite et de cartes déjà anciennes permet de repérer les villages de la région et leur évolution (l'un d'entre eux, **Nagortsy**, a disparu sous le lac de refroidissement ; un autre **Yanov**, station du chemin de fer, aurait été absorbé par **Pripyat**). Il y a un bon accord entre le nombre des bourgades par couronne fourni par le rapport soviétique sur l'accident et les agglomérations observées sur les photographies,
- les quelques quarante-cinq mille habitants de la ville nouvelle de **Pripyat** qui s'étend au Nord-Ouest à la limite des trois kilomètres, n'apparaissent pas clairement. En fait, cette ville nouvelle couvre plusieurs anciens hameaux et doit inclure par exemple **Zimovishche**. Elle pourrait d'ailleurs s'étendre beaucoup plus loin (le rapport soviétique est muet sur ce point), peut-être jusqu'à **Novo-Sepelitchi** à 15 km à l'Ouest de la centrale...
- entre 15 km et 20 km, les nombres de personnes déplacées semblent indiquer qu'il n'y a pas eu partout évacuation totale. Sinon, il y auraient plus de 11 600 habitants évacués entre 15 km et 20 km du site puisque cette couronne comporte **Tchernobyl** et ses 12 500 habitants. Le problème est identique entre 20 km et 30 km,
- il y a, dans un cercle de 50 km centré sur le site, une trentaine de bourgs de moins de 5 000 habitants. Cela conduit à estimer la population entre 400 000 habitants et 600 000 habitants dans un rayon de 50 km autour de **Tchernobyl**, sans grande concentration urbaine.
- au delà de 50 km, les villes notables paraissent être **Chojniki** à 55 km au Nord en Biélorussie, **Ovrucht** à environ 100 km à l'Ouest, et surtout **Tchernigov** (150 000 habitants) à 80 km à l'Est. L'agglomération de KIEV, deux millions et demi d'habitants, est à 100 km au Sud.

En résumé, l'environnement du site paraît relativement peu peuplé, mais, les chiffres avancés dans le rapport soviétique sur l'accident, par suite de leurs contradictions, rendent malaisée une analyse précise.

4.- CLIMATOLOGIE

Comme tous les climats de la partie européenne de l'Union Soviétique, le climat de l'Ukraine, de type continental, est dominé par des circulations anticycloniques de provenance asiatique en hiver (anticyclone de Sibérie) et atlantique en été (anticyclone des Açores).

Les éléments essentiels sur la météorologie sont rassemblés dans le tableau A.1

Ce climat est caractérisé par des changements rapides de température au passage de l'hiver à l'été et réciproquement. Cependant il a un caractère méridional marqué par un été assez long et chaud, l'hiver froid et rude ne durant que de trois à quatre mois. Le printemps est bref et fluctuant, l'automne traîne en longueur. L'amplitude moyenne thermique annuelle est de 25,2 °C, entre - 5,9 °C en janvier et 19,3 °C en juillet (à titre de comparaison, **Amiens**, à la même latitude, connaît une amplitude de 16 °C).

Les vents dominants à **Kiev** sont de Nord-Ouest durant la majeure partie de l'année. Cependant, un problème général en Ukraine est l'existence de vents desséchants de Sud-Est (soukhoviei). Contre ceux-ci, le gouvernement soviétique a fait installer, depuis une vingtaine d'années, des rideaux d'arbres ; cette opération menée à bien sur tout le pays et les terres limitrophes, soit sur une surface double de celle de la France, a permis de freiner le vent au niveau du sol et de réduire ses effets désastreux. Les trombes sont rares.

Les précipitations annuelles moyennes sont de l'ordre de 600 mm avec des pointes maximales à plus 900 mm et minimale à 400 mm. Les pluies sont à peu près réparties tout au long de l'année avec une légère pointe durant le printemps et le début de l'été. Le maximum en 24 heures s'établit autour de 75 mm. Le manteau neigeux en hiver ne dépasse guère en général 25 cm ; des pointes de près d'un mètre de neige ont cependant été signalées. L'été finit dans la sécheresse, et parfois même l'aridité lorsque viennent les vents chauds et secs. Dans le cas, l'humidité relative peut tomber à 15 %. On observe, en moyenne, 77 jours de brouillard par an.

5.- GEOLOGIE

5.1.- Caractéristiques géologiques régionales

Le site de la centrale de **Tchernobyl** se trouve au cœur d'un grand bassin sédimentaire traversé par le cours du Dniepr et reposant sur le socle primaire ; ce bassin se compose du bas vers le haut de terrains correspondant au Secondaire, pour l'essentiel des calcaires, et au Tertiaire caractérisé par une alternance de sables et d'argiles plus ou moins marneuses. Les couches sont pratiquement horizontales et continues ce qui autorise des extrapolations à longues distances.

Les terrains quaternaires superficiels sont relativement épais ; ils peuvent atteindre une quarantaine de mètres de puissance car ils comportent des dépôts morainiques des dernières glaciations (pour l'essentiel, celle du Riss) sous les lœss éoliens récents.

Au droit de **Kiev**, l'épaisseur totale de ces sédiments est de l'ordre de deux cents à deux cent cinquante mètres ; sous le site, il est vraisemblable, d'après le tracé de la carte géologique, qu'elle soit du même ordre. A une soixantaine de kilomètres à l'Ouest du site, une remontée du socle primaire fait affleurer ce dernier au voisinage de **Naroditchi** (figure A.9). Il est possible également qu'une légère ride Ouest.Sud.Ouest-Est.Nord.Est se dégage de cette remontée du socle et, passant à proximité du site, remonte son compartiment sud. La nature de cette ride ne peut pas être précisée mais aucun indice de faille n'a pu être relevé sur les cartes consultées.

5.2.- Caractéristiques géologiques locales

Bien qu'aucun document relatif à la géologie locale du site ne soit disponible, il est possible, compte tenu de l'horizontalité et de la régularité des niveaux, de tenter d'extrapoler la coupe géologique locale de **Kiev**, publiée à l'occasion du Congrès Géologique International de **Moscou** en 1937, pour en déduire celle relative au site. Les résultats de cette extrapolation sont présentés sur la figure A.10 : la vallée de la Pripyat semble creusée dans les marnes du Kievien (Eocène supérieur) jusqu'aux sables sous-jacents du Buchakien (Eocène inférieur).

Dans ces derniers niveaux, des passées de grès sont signalées à **Tchernigov**. Ils peuvent correspondre à la couche de grès dur à 6 m sous la surface du sol évoquée par les autorités soviétiques, le 26 mai 1986.

Il est donc possible de penser que l'érosion a traversé complètement les marnes et que les alluvions de la Pripyat sont en contact avec les sables buchakiens.

La situation précise du site dans le schéma proposé par la coupe de la figure A.10 est, en fait, inconnue. En effet, dans le rapport soviétique, aucune information ne précise si le réacteur d'une part et le lac de refroidissement d'autre part sont fondés sur les alluvions de la Pripyat, sur le biseau d'érosion des marnes ou sur les sables sous-jacents, ou même sur d'autres formations. On sait, en effet, par d'autres sources que la vallée de la rivière Pripyat est plus ancienne que celle du Dniepr et que des dépôts marins peuvent s'y intercaler entre les alluvions et le bed-rock, ce qui ne contribue pas à simplifier le problème. La présence de grès, sous le radier du réacteur, semblerait cependant indiquer que ce dernier serait fondé directement sur l'aquifère buchakien.

6.- SISMOLOGIE

La carte des intensités maximales observées dans l'Union des Républiques Socialistes Soviétiques place le site dans une zone d'intensité V MSK ; la zone la plus proche d'intensité supérieure se trouve à plusieurs centaines de kilomètres (figure A.11). La sismicité est donc faible pour le site de **Tchernobyl**.

7.- HYDROGEOLOGIE

7.1.- Caractéristiques hydrogéologiques régionales.

Vers le Sud, et à l'échelle régionale, les hydrogéologues soviétiques ont mentionné, pour le Congrès Géologique International de 1984 à **Moscou**, deux horizons aquifères principaux aux environs de **Kiev** :

- les niveaux plus ou moins continus des sols et des sables fluvio-glaciaires,
- les sables du Karkovien (base de l'Oligocène).

On sait par ailleurs que de nombreux sondages ont été exécutés entre les années 1930 et 1937 dans la région de **Kiev** pour l'alimentation en eau de la ville. Ces sondages traversent les couches sableuses probablement aquifères de la base du Tertiaire et peut être aussi le Secondaire sous-jacent. Dans ce cas, ce type d'alimentation en eau potable pourrait être très vulnérable. On peut enfin supposer que des relations s'établissent entre les nappes en aval de **Tchernobyl**. L'observation des cartes géologiques laisse à penser qu'il pourrait y avoir alimentation des nappes par le Dniepr au droit des nombreuses retenues qui s'échelonnent jusqu'à la Mer Noire, et réalimentation plus ou moins localisée du fleuve par les nappes à l'aval de chaque barrage.

Vers le Nord (limite de l'Ukraine et Sud de la Biélorussie), il faut, selon toute vraisemblance, y ajouter les sables et grès du Buchakien. En outre, certains niveaux fluvio-glaciaires peuvent être en contact avec les horizons du Karkhovien et du Buchakien.

7.2.- Caractéristiques hydrogéologiques locales.

A l'échelle du site, il existe certainement une nappe dans les alluvions de la Pripyat. Localement, il est difficile de dire si cette nappe est confondue avec celle des sables buchakiens sous-jacents, ou même, comme il est indiqué ci-avant, si elle est en relation avec d'anciens dépôts marins. Cependant, d'après les informations fournies par le rapport soviétique, la nappe exploitée régionalement pour l'eau potable est séparée des dépôts quaternaires superficiels par des marnes relativement imperméables, probablement du Kievien. Le rapport précise également que le niveau de la nappe est lié à celui de la rivière Pripyat. Ces faits convergent pour confirmer que cette dernière a creusé sa vallée dans les marnes et jusqu'aux sables du Buchakien. Ainsi, la nappe régionale du Buchakien pourrait communiquer (ou être confondue) avec la nappe sous fluviale (nappe des alluvions).

Si ces interprétations sont exactes, la majeure partie de la nappe peut être protégée, par la couche des marnes, des infiltrations radioactives créées par les eaux pluviales ayant plus ou moins lessivé des retombées. Mais la durée de cette protection dépend de l'importance et de l'imperméabilité des marnes. Cependant, dans les vallées où les marnes ont été érodées, la nappe pourrait être plus directement vulnérable. Ce serait le cas, sous ou à proximité immédiate du site.

Les interventions réalisées juste après l'accident montrent que les soviétiques ont pris presque autant de soins pour la protection des eaux souterraines que pour limiter les rejets atmosphériques. L'importance des moyens et la rapidité de leur mise en œuvre (creusement d'une galerie sous le radier pour mettre en place un dispositif d'extraction de chaleur et empêcher la contamination des eaux souterraines) suffit à confirmer la très grande vulnérabilité de la nappe.

Les décisions suivantes, prises très vite malgré l'importance des travaux de décontamination en cours, montrent le degré d'urgence de cette protection. La mise en place d'une enceinte étanche "le long d'une partie du périmètre du site industriel avec installations de puits de rabattements" indique que la pollution était en voie d'atteindre rapidement la nappe si cette dernière n'était pas déjà partiellement atteinte (peut-être par les eaux injectées pour refroidir le cœur et qui ont circulé dans les bâtiments du site).

En conclusion, il semble que la nappe exploitée pour l'eau potable dans la région circule dans les sables du Buchakien, qu'elle soit protégée, hors des vallées, par les marnes du Kievien et que cette protection diminue ou disparaisse dans la vallée de la Pripyat et en particulier sous le site.

8.- HYDROLOGIE

En amont, soit au Nord et à l'Ouest, les abords de la rivière Pripyat, qui sur 775 km de long draine les marais de Polésie, sont marécageux ; à l'automne et au printemps, la région n'est qu'une vaste nappe lacustre de 40 cm à 60 cm de profondeur.

Près du site, la rivière présente de très nombreux méandres et bras morts comme l'illustre fort bien le cliché photographique pris par le satellite SPOT et les cartes détaillées (figures A.5 et A.6). L'eau coule, indique le rapport soviétique, à une vitesse de $0,4 \text{ ms}^{-1}$ à $0,5 \text{ ms}^{-1}$. Le débit moyen est de $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Les réacteurs de ce site, prévu pour six tranches de 900 MWe, s'alimentent en eau de refroidissement dans un lac artificiel allongé, orienté Nord.Ouest-Sud.Est, de 12 km de long sur 2 km de large, aménagé sur les alluvions de la rivière. Il est vraisemblablement alimenté par pompage en partie nord ; un exutoire est visible au point le plus au Sud. Ce lac sert de bassin de rejet des eaux brutes de refroidissement qui sont recyclées grâce à un circuit imposé par une digue centrale. Par sa superficie, il favorise les échanges thermiques avec l'atmosphère. Ce système a dû s'avérer nécessaire à cause des périodes estivales au cours desquelles les températures peuvent être élevées et des situations de sécheresse, voire d'aridité, se présenter et, éventuellement, à cause aussi des périodes de gel de la rivière. Il devait être complété par deux aéroréfrigérants.

Comme il a été signalé, les eaux pompées en partie amont du lac sont restituées à la Pripyat en aval. Elles atteignent la retenue de **Kiev** sur le Dniepr après un parcours d'une vingtaine de kilomètres. Les très faibles pentes de la Pripyat et donc les très faibles vitesses de courant peuvent induire des temps de transfert des rejets jusqu'à **Kiev** relativement longs.

Dans cette retenue (figure A.12), les eaux pénètrent dans une masse très importante, de l'ordre de quatre milliards de mètres cubes, alimentée par le Dniepr (débit moyen dans sa partie méridionale de l'ordre de $2\,000 \text{ m}^3/\text{s}$) et au moins cinq autres rivières l'Uz, la Teterev, la Zdwyth, l'Irpen en rive droite, et une en rive gauche, la Desna. Le régime du Dniepr comporte des maigres en hiver durant les périodes de gel, une forte poussée d'écoulement au printemps avec la fonte des neiges ($5\,000 \text{ m}^3/\text{s}$) et de nouveaux maigres en été par suite de l'évaporation.

Après dilution et diffusion au sein de cette masse d'eau, et un séjour vraisemblablement long pour atteindre le barrage qui verrouille la retenue au Nord de la ville de **Kiev**, soit à environ 100 km

du confluent de la Pripyat, les eaux sont brassées par turbinage ou passent par les évacuateurs de crue pour gagner le cours d'eau qui traverse **Kiev** (tableau A.2). Les eaux entrent alors dans une suite de retenues, Kanev, Kremenchug, Dniepropzherjinsky, Dniepropetrovsk, et enfin Kahkovka, avant d'atteindre la Mer Noire après un parcours de plus de 1 000 km depuis **Tchernobyl**. Les retenues de Kanev et de Kremenchug servent de stockages d'eau pour la distribution.

9.- ECONOMIE RURALE

C'est largement au Sud du site que commencent les vastes étendues de steppes propices à la culture des céréales et de la betterave sucrière caractéristiques de l'Ukraine (figure A.13). Aux environs de **Kiev** se développe la forêt mixte où des essences méridionales comme le tilleul et le charme viennent se mêler aux conifères. Au Nord du site, s'étend une vaste zone couverte de marais et de forêts.

La région du site n'est pas très riche sur le plan de l'agriculture. Le système agricole est, en effet, dominé par les céréales pauvres comme le seigle et le sarrasin associées au lin-fibre et à la pomme de terre. L'assèchement progressif des marais de la Polésie permet l'extension des cultures fourragères et l'installation d'élevage de bétail à cornes et de porcins. La forêt y est surtout formée de conifères.

Cette description régionale semble bien être confirmée par l'examen des photographies prises par satellites et les cartes détaillées. La vallée de la Pripyat est constituée, sur une largeur de plusieurs kilomètres, de méandres non cultivés. Les berges, ainsi que les environs immédiats de la centrale, paraissent être des friches. Plus au Sud s'étendent de vastes forêts et des parcelles agricoles souvent longues de plusieurs kilomètres. En rive gauche, c'est-à-dire vers le Nord, le développement agricole paraît moins poussé et les cartes mentionnent de nombreux marais.

Un décompte rapide à partir de la photographie prise par satellite donne les pourcentages de superficie suivants pour les différents types de terrains dans les environs de la centrale :

Sols alluviaux et marais	: 40 %
Friches	: 12 %
Forêts	: 19 %
Zones de grandes cultures	: 27 %
Zones urbanisées et petites cultures	: 1 %

10.- REFERENCES

Ouvrages généraux et données sur l'environnement agricole et industriel et les populations :

Carte routière d'U.R.S.S. Occidentale au 1/2 000 000, (1984)
Edition Ravenstein Verlag, Francfort-sur-Main.

Europa, Westlicher Teil der UdSSR au 1/3 000 000, (1983)
Edition Haak, Gotha.

Map of Ukraine, V. KUBIJOVITCH et A. ZUKOVSKY, (1978)
Edition Karl Wenschow, Munich.

Clichés photographiques SPOT :

1^{er} mai, clichés noirs et blancs aux échelles approximatives 1/12 500 et 1/37 500.

6 mai, cliché fausses couleurs à l'échelle approximative du 1/50 000.

Spot. Product. CNES-IGN/Dist. Spot Image, CNES, Toulouse, (1986).

Carte of Romania and U.S.S.R., 1/500 000,
produced under the direction of Military Survey, Ministry of Defense, United Kingdom, (1982),
compiled en 1981.
Serie TPC, sheet E.3C, Edition 4-GSGS.

Carte de Chernigov (U.S.S.R.), 1/250 000,
prepared under the direction of the Department of Defense and published by the US Army
Topographic Command, Washington, DC 20 315, compiled in 1967 from best available source
material.
Serie 1501, sheet NM 35-1, Edition 1.

Carte d'Ovruch (U.S.S.R.), 1/250 000,
prepared under the direction of the Defense Intelligence Agency and published by Army Map Service
Corps of Engineers, US Army, Washington, DC 20.315, compiled in 1967 from best available source
material.
Serie 1501, sheet NM 35-1, Edition 1.

Carte de Chernobyl (U.S.S.R.), 1/50 000,
prepared by the Army Map Service (AECPE), Corps of Engineers, US Army,
Washington DC, compiled in 1967.
Serie N 701, sheet 4620 IV, Edition 1. AMS.

Géographie de l'U.R.S.S. par P. GEORGE, (1983)
Presses Universitaires de France, coll. Que sais-je ? n° 1079

L'U.R.S.S. par A. BLANC et H. CHAMBRE, (1975)
Presses Universitaires de France, coll. Magellan.

Panorama de l'U.R.S.S., M-A. CROSNIER, H. GICQUIAU, A. GIROUX, M. KAH, (1984)
Le courrier des pays de l'Est, Mensuel d'Informations Economiques, n° 226-227.

L'Ukraine Soviétique, (1984),
Editions politiques ukrainiennes, Kiev.

R.S.S. de Biélorussie, Chiffres et Faits 84, (1985)
Editions Belarus, Minsk.

The Accident at the Tchernobyl' Nuclear Power Plant and its consequences Informations compiled for
the AIEA Experts' Meeting, 25-29 August 1986, Vienna,
Part I General Material, Part II et Part III, Annexes.

Ouvrage de météorologie :

World Survey of Climatology. Climates of the Soviet Union (vol. 7), (1975) by Paul. E. LYDOLPH (Department of Geography - University of Wisconsin-Milwaukee).
Elsevier Scientific Publishing Company, New-York.

Ouvrages de géologie et d'hydrogéologie :

Carte Géologique Internationale de l'Europe et des régions riveraines de la Méditerranée au 1/5 000 000, (1971)
Coédition UNESCO-BGR, Paris.

Carte Géologique Internationale de l'Europe au 1/1 500 000, Feuille E4, (1978).
Coédition UNESCO-BGR, Paris.

International Geological Congress, XVII Session, Moscou 1937, Ukrainian Soviet Socialist Republic,
Guide Book of the Southern Excursion.

International Geological Congress, XXVII Session, Moscou 1984, Ukrainian Soviet Socialist Republic,
Guide Book Excursion 20, Engineering geology and hydrology of the southern Ukrain.
Guide Book Excursion 25, Quaternary Geology of the Dniepr area.

International Geological Congress, XXVII Session, Moscou 1984, Byelorussian Soviet Socialist Republic,
Guide Book Excursion 24, Glacial Deposits of Byelorussia.

Ouvrage de sismologie :

Carte des Intensités Maximales de l'U.R.S.S. à l'échelle du 1/5 000 000, (1983),
Publication de l'Académie des Sciences de l'URSS, Moscou.

Ouvrage d'hydrologie :

Registre Mondial des Barrages (1979),
Commission Internationale des Grands Barrages, Paris.

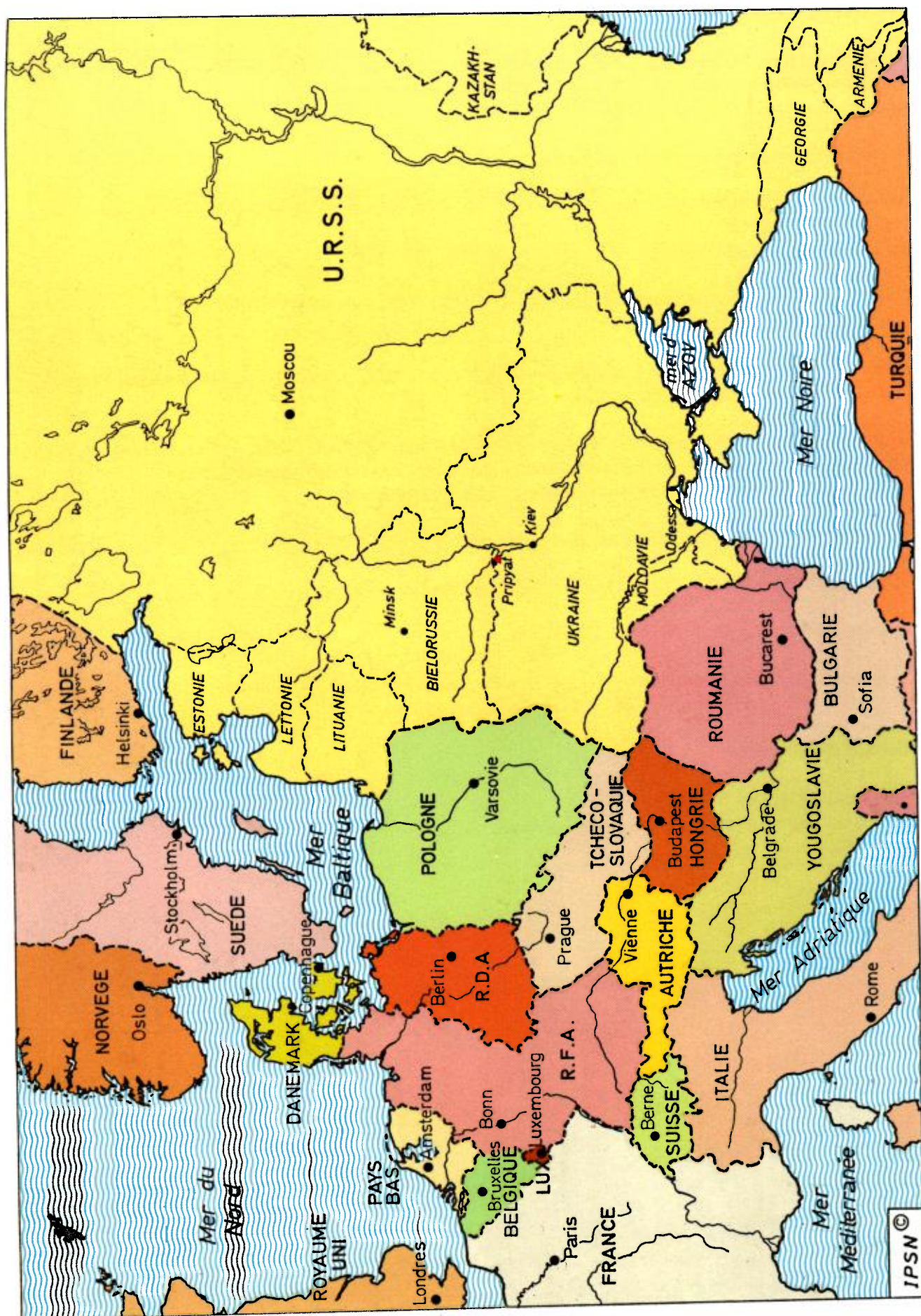


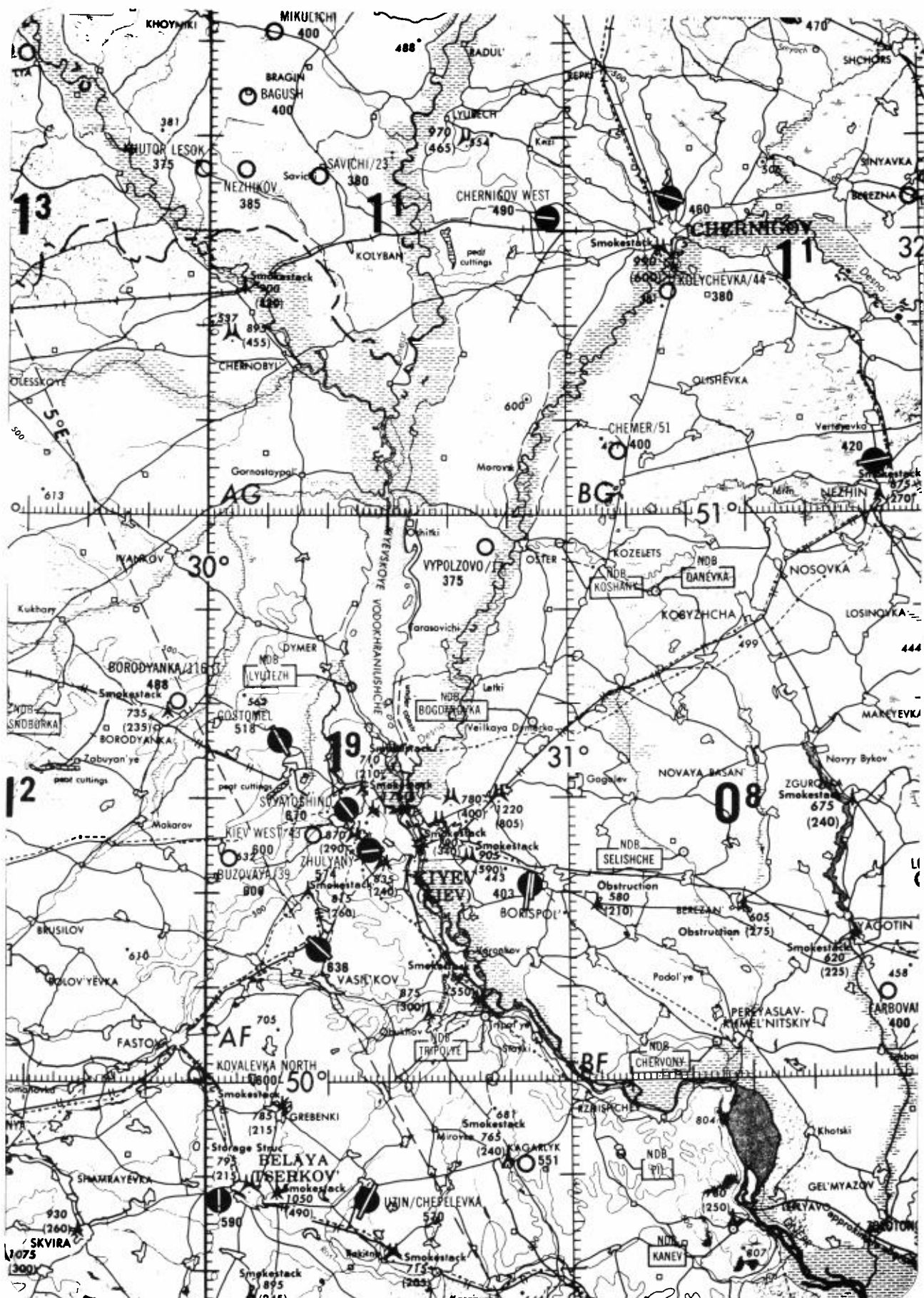
FIGURE A-0

LOCALISATION du SITE de TCHERNOBYL



IPSN ©

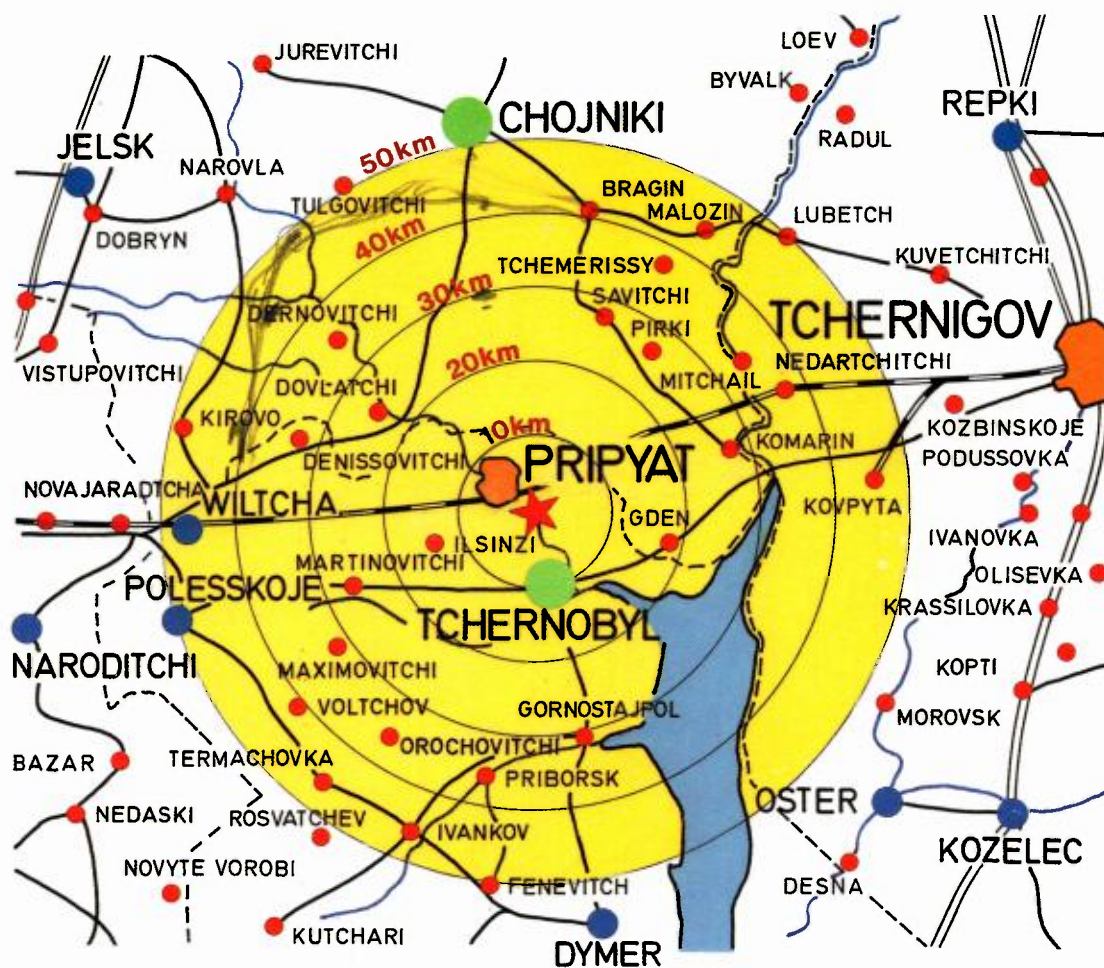
FIGURE A-1



**CARTE DE LA GRANDE REGION
DE LA CENTRALE DE TCHERNOBYL**

FIGURE A-2

POPULATION AUTOUR de la CENTRALE de TCHERNOBYL dans un RAYON de 50km



0 10 20km 1/500 000 approximatif

● moins de 5 000 hab.

● de 10 000 à 20 000 hab.

● de 5 000 à 10 000 hab.

● plus de 20 000 hab.

CARTE DE LA REGION DE LA CENTRALE DE TCHERNOBYL



FIGURE A-4

CARTE DES ENVIRONS DE LA CENTRALE DE TCHERNOBYL

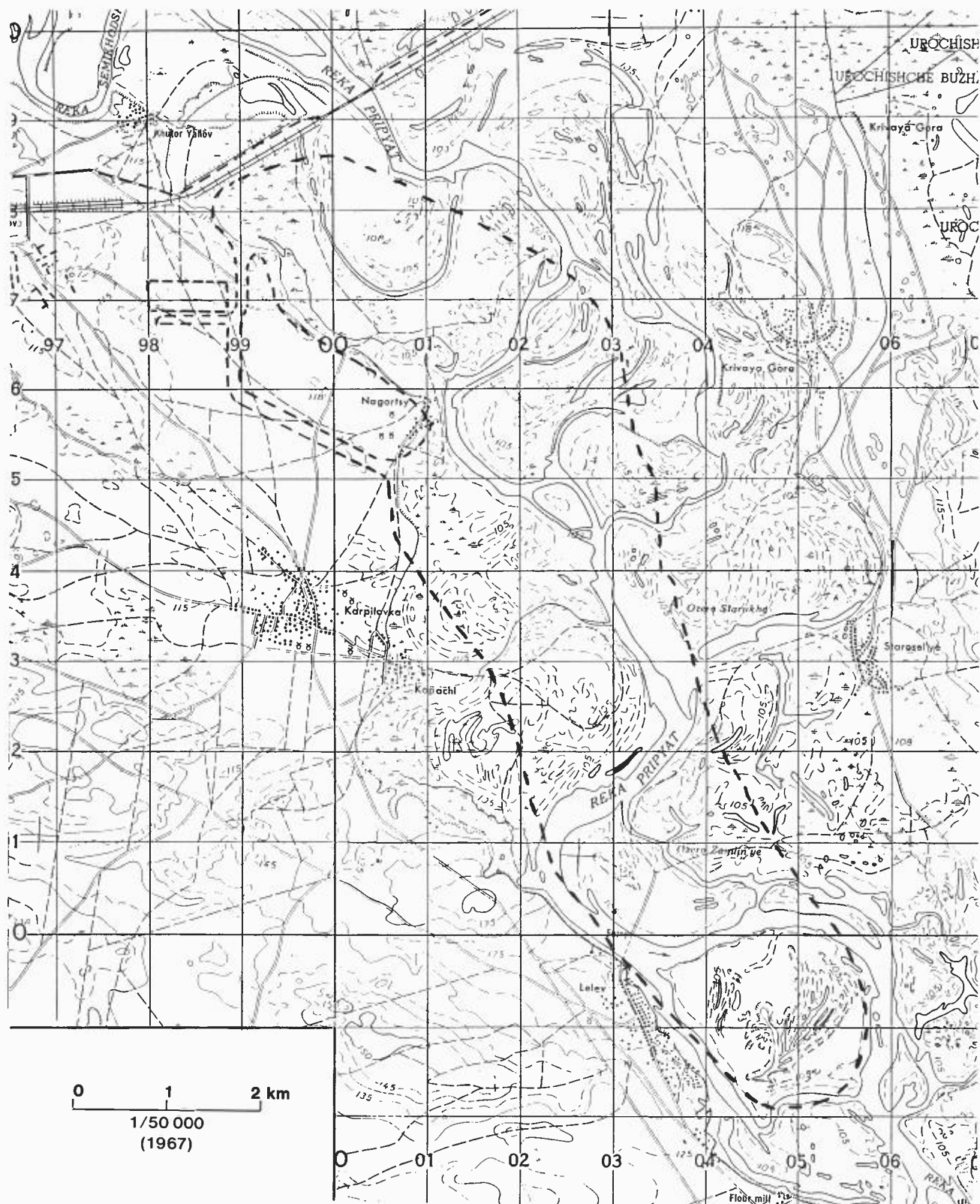
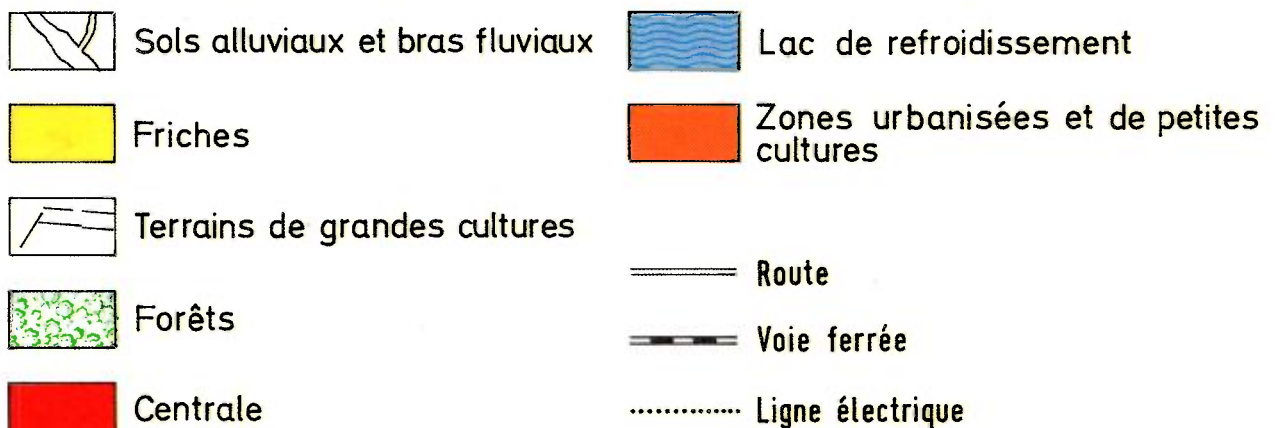
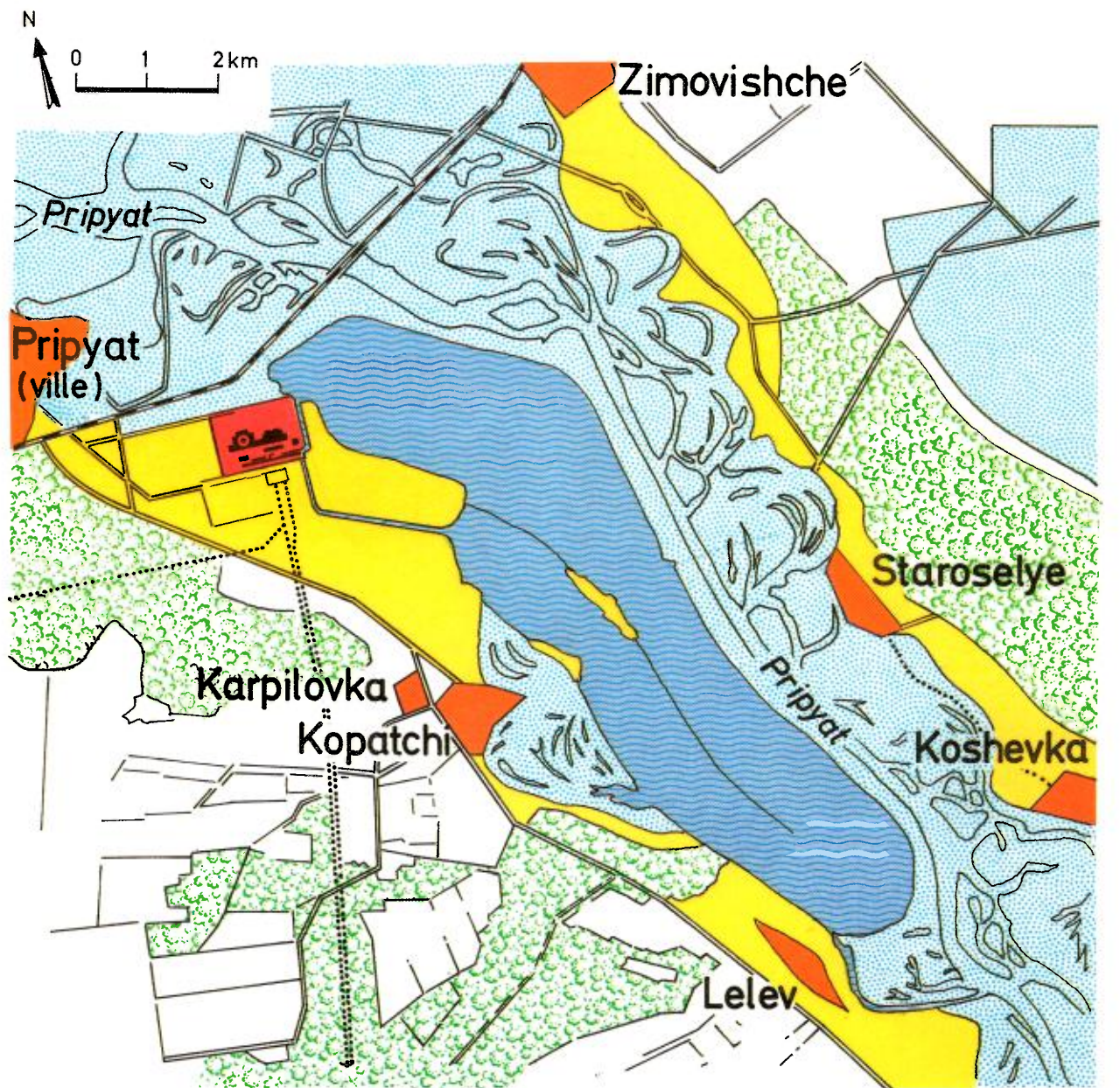


FIGURE A-5

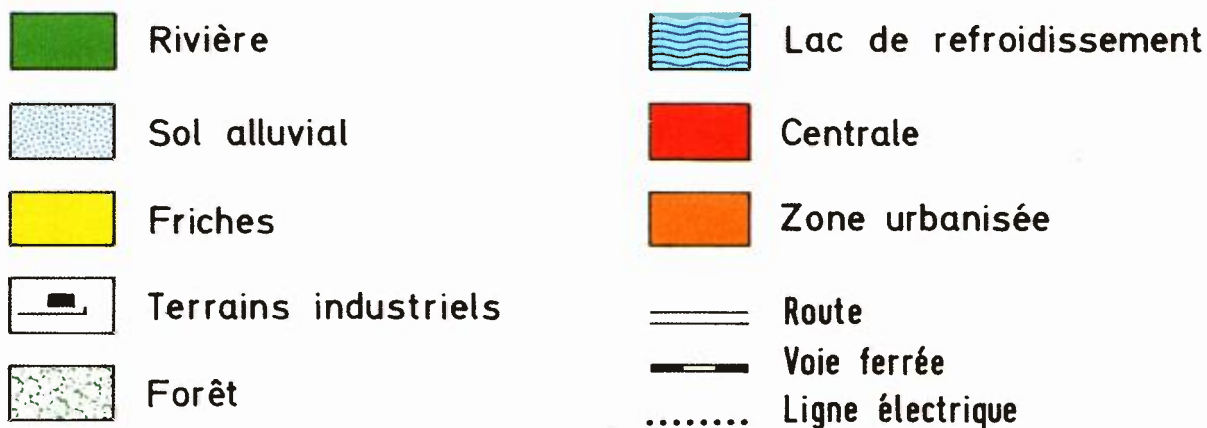
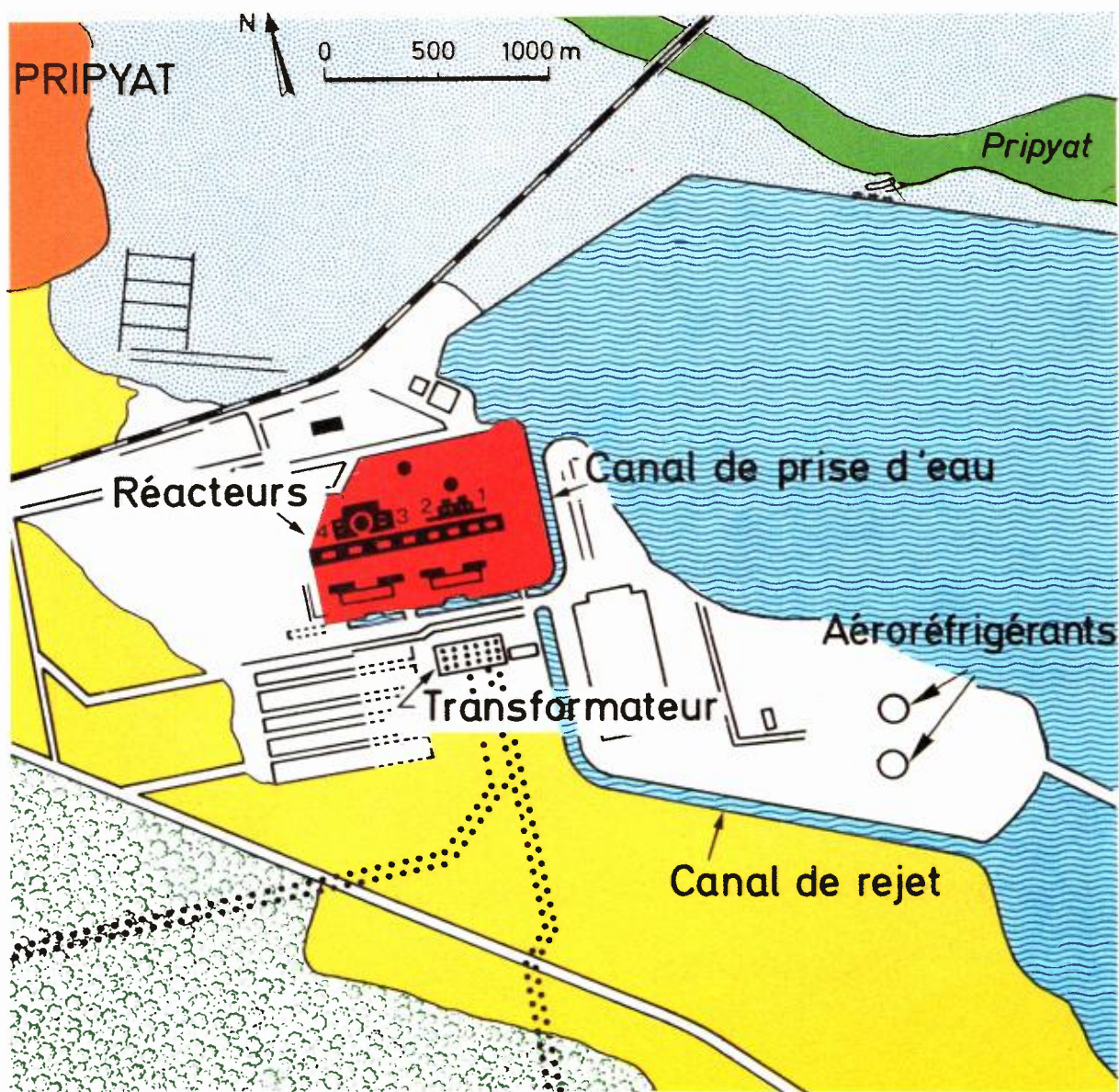
SCHEMA INTERPRETATIF des ENVIRONS de la CENTRALE à PARTIR des CLICHES SPOT



IPSN ©

FIGURE A-6

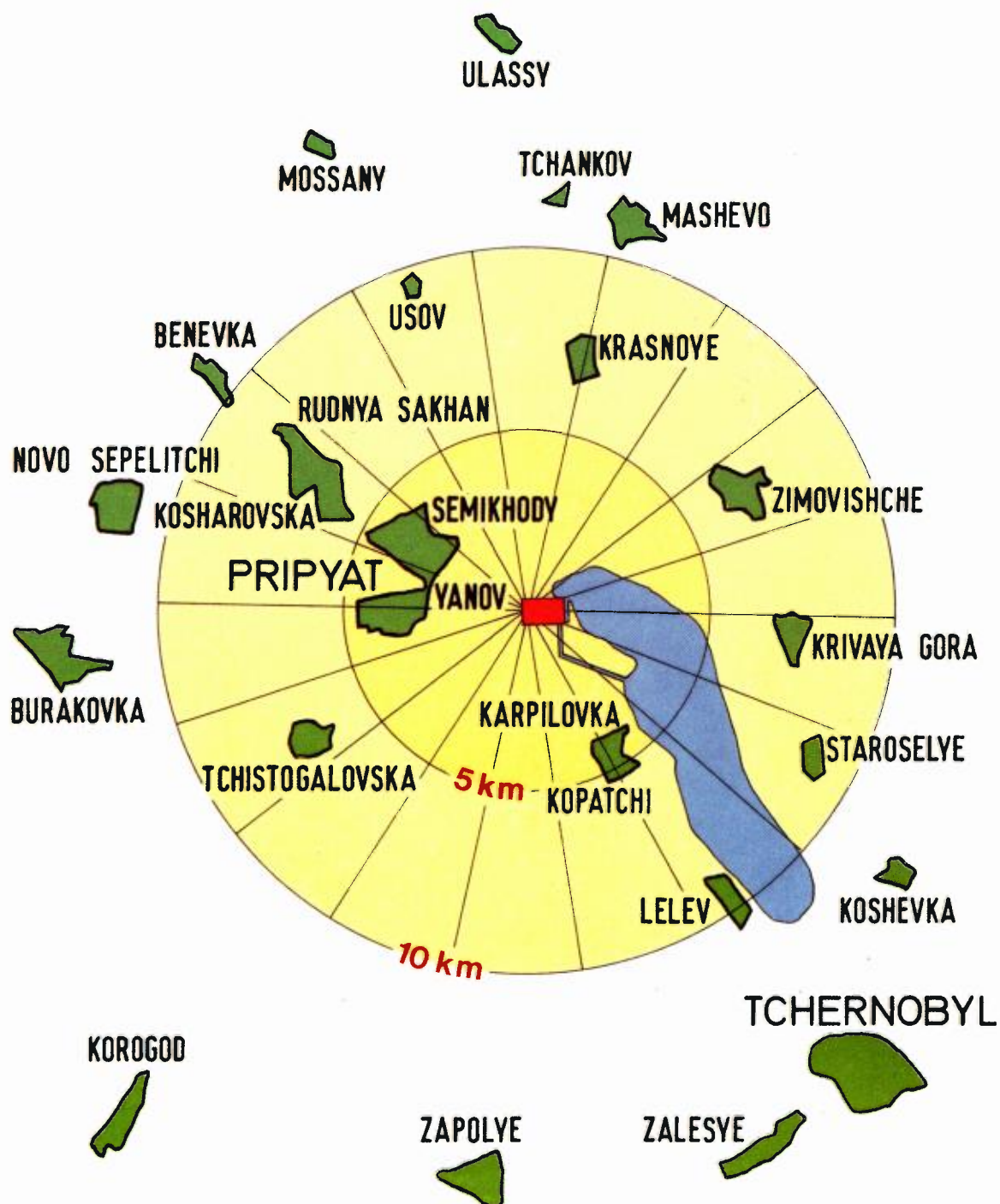
SCHEMA INTERPRETATIF de la CENTRALE à PARTIR des CLICHES SPOT



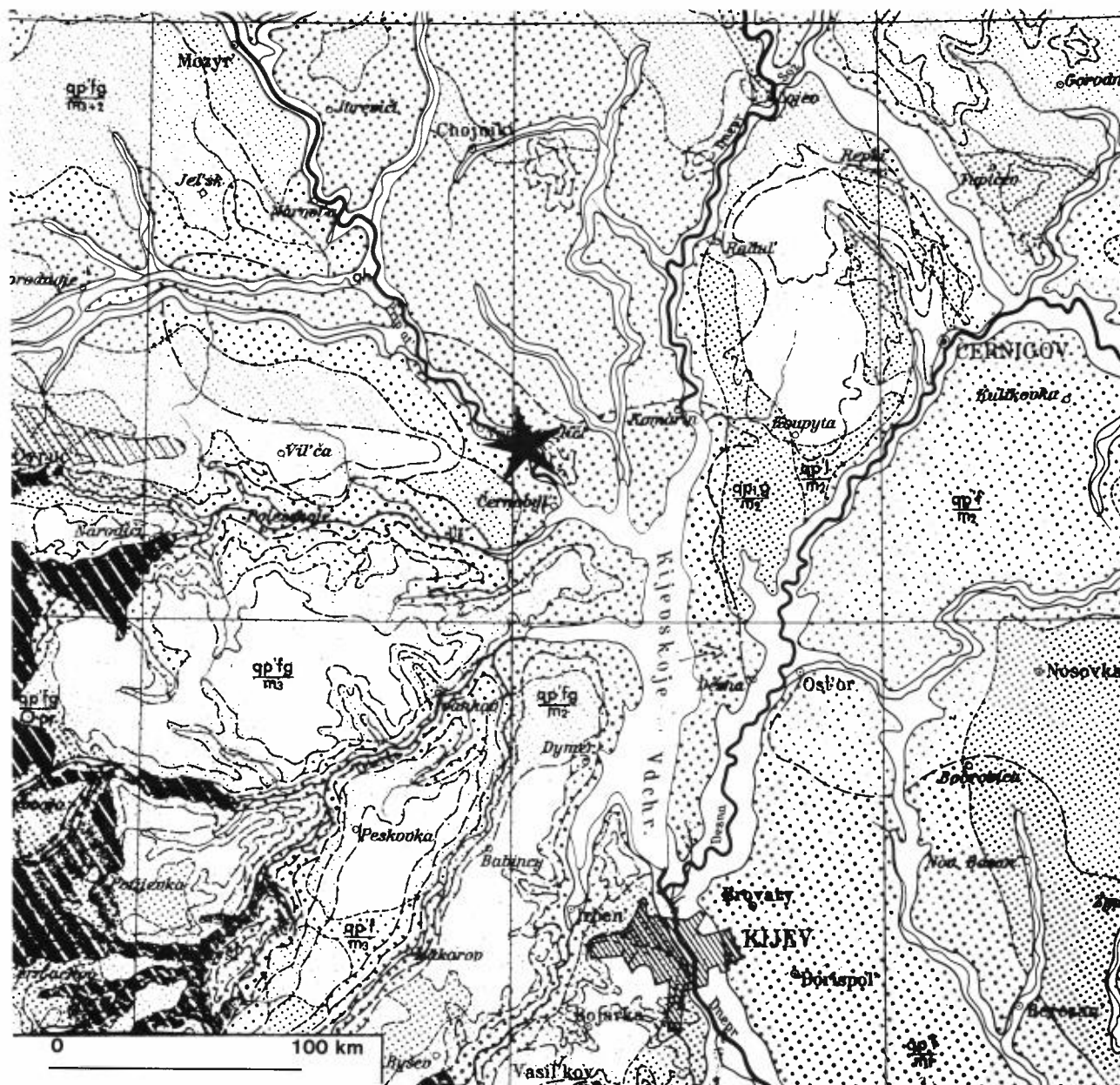
IPSN ©

FIGURE A-7

POPULATION AUTOUR de la CENTRALE de TCHERNOBYL dans un RAYON de 10 km



CADRE GEOLOGIQUE
Extrait agrandi de la carte de l'Europe au 1/1 500 000

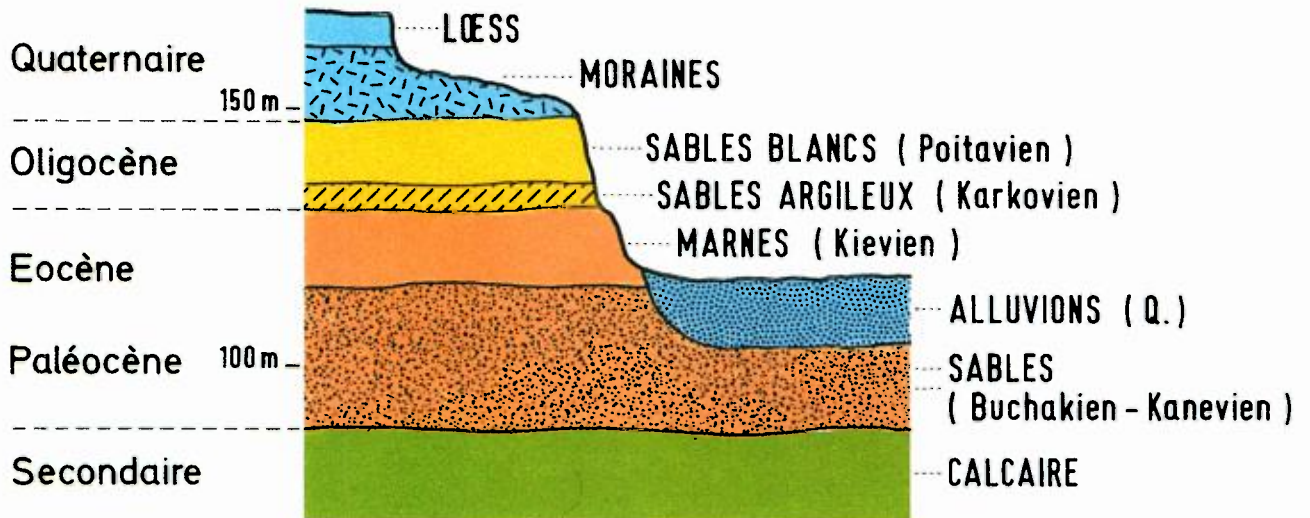


m_3 : Miocène m_2 : oligocène m_1 : Eocène pr : Primaire
(en couverture, qp : pleistocène, l : loess, f : fluviale, g : glaciaire)

FIGURE A-9

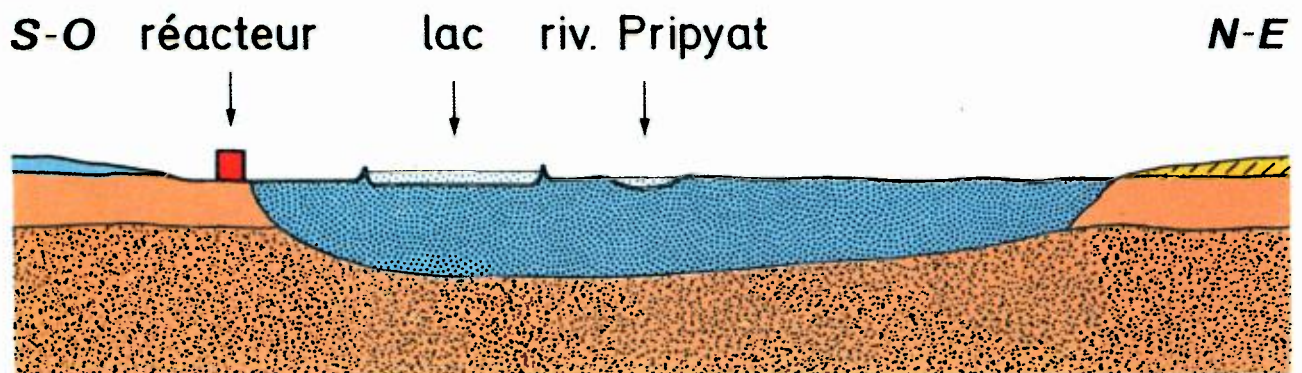
coupes géologiques

Région de KIEV



Région de TCHERNOBYL

(extrapolation)



0 1 km

(Coupe établie sur la base des informations disponibles au 1 Septembre 1986)

CARTE DES INTENSITES MAXIMALES OBSERVEES D'U.R.S.S.

d'après la carte officielle Soviétique au 1/5.000.000



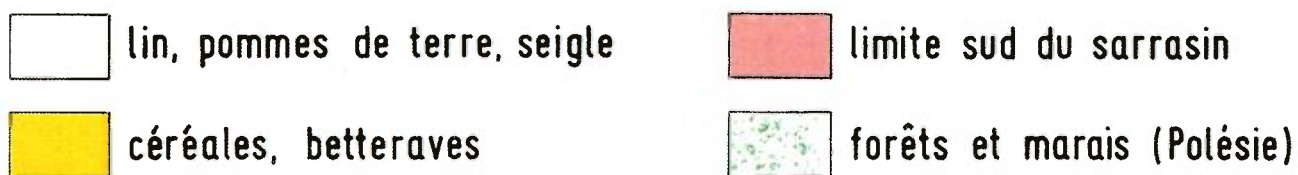
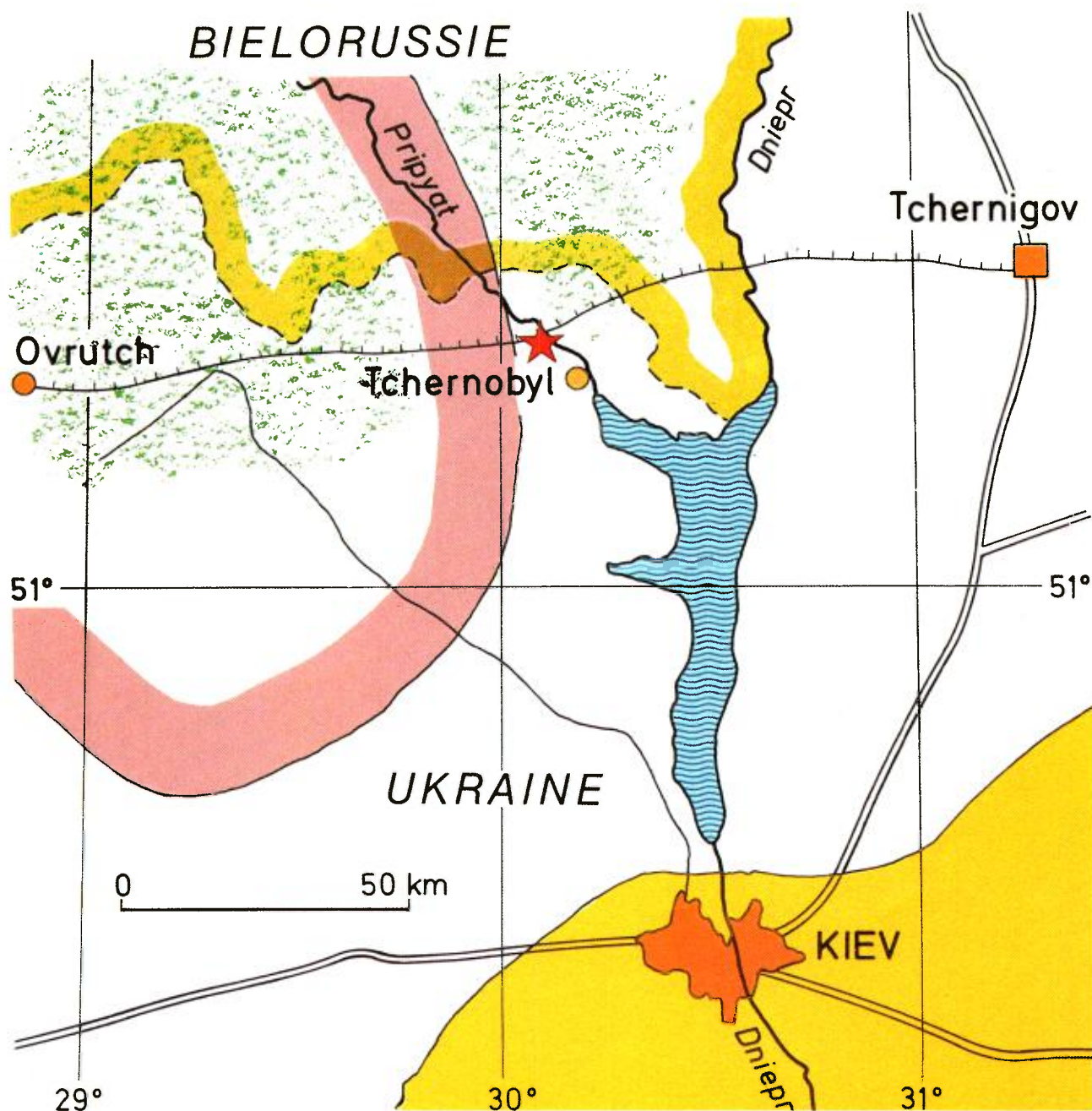
FIGURE A-11

BASSIN du DNIÉPR en AVAL de TCHERNOBYL

BIELORUSSIE



CULTURES et VEGETATION dans le NORD de l'UKRAINE



IPSN ©

d'après A. BLANC et H. CHAMBRE

FIGURE A-13

TABLEAU A-1

CONDITIONS METEOROLOGIQUES A KIEV

Mois	Température (° C)			Vent		Précipitations (mm)		
	moy.	max.	min.	Direc. majeure	Vit. (m/s)	moy.	max.	min.
Janv.	– 5,9	9	– 33	W	4,3	43	088	3
Fév.	– 5,3	12	– 34	NW	4,5	39	113	5
Mars	– 0,5	21	– 26	NW	4,3	35	088	2
Avril	7,1	29	– 11	NW	4,3	46	142	1
Mai	14,7	33	– 3	N	3,8	56	144	4
Juin	17,4	34	2	NW	3,7	66	239	7
Juillet	19,3	39	5	NW	3,5	70	195	5
Août	18,2	39	3	NW	3,5	72	223	5
Sept.	13,6	33	4	NW	3,7	47	149	2
Oct.	7,7	27	– 19	W	3,9	47	141	1
Nov.	1,1	23	– 23	SE	4,3	53	127	2
Déc.	– 3,7	13	– 31	SE	4,2	41	103	5

Tableau établi à partir des données de E. LYDOLPH.

TABLEAU A-2

BARRAGES SUR LE DNIÉPR

Nom	Année d'achèvement	Type	Hauteur (m)	Longueur de crête (m)	Volume du barrage (10 ⁶ m ³)	Capacité du réservoir (10 ⁹ m ³)	Capacité des évacuateurs 10 ³ m ³ /s	Superficie 10 ³ km ²	Destination
KIEV	1964	PG	68	285	43	3,7	9,00	0,92	HN
		TE	22	40 900					
KANEV	1976	TE	40	339	0,450	2,6	18,55	0,64	HNS
KREMENT CHUG	1960	PG	33	191	0,193	14,0	20,35	2,2	HNIS
		TE	30	11 953	32				
DNI EPRO DZER JINSKY	1964	PG	34	192	0,231	2,5	20,00	0,57	HN
		TE	21	35 450	22				
DNI EPRO PETROSK	1932	PG	60,5	761	0,732	3,3	25,90	0,11	HNI
KAHKOV-KA	1955	PG	37	440	0,640	18,2	19,90	2,1	HNI
		TE	30	3 192	35				

PG : Barrage poids.
TE : Digue en terre.
H : Hydroélectricité.

N : Navigation.
S : Distribution d'eau.
I : Irrigation.

Tous ces barrages ont des déversoirs à vannes.

Bibliographie

- 1** - USSR State Committee on the utilization of atomic energy.
The accident at the Tchernobyl Nuclear power plant and its consequences
(3 volumes) compiled for the IAEA Experts' Meeting in Vienna (22.8.86).
- 2** - Agence Internationale de l'Energie Nucleaire (INSAG)
Summary report on the post-accident review meeting on the
Tchernobyl accident (30/8 - 5/9/86 Vienna).
- 3** - Rapports SCPRI
 - Tableaux Mensuels de Mesures juin 1986,
 - Résultats des Contrôles Spéciaux consécutifs à l'accident de Tchernobyl.
- 4** - Rapport IPSN 2/86 version 2 juin 1986.
L'accident de Tchernobyl.

IMPRESSION
REPROGRAPHIE INDUSTRIELLE
91430 IGNY - 69.41.03.21

**INSTITUT DE PROTECTION
ET DE SURETE NUCLEAIRE**

Centre d'Etudes Nucléaires de Fontenay-aux-Roses

**68, avenue du Général Leclerc
92260 FONTENAY-AUX-ROSES**

TEL. (1) 46 54 70 80