

ISSN - 0250 - 5010

ANNALEN
VAN
DE BELGISCHE VERENIGING
VOOR
STRALINGSBESCHERMING

VOL. 24, N°4

1e trim. 2000

**CRISIS MANAGEMENT AFTER AN EXTENSIVE RADIOACTIVE
CONTAMINATION**

**GESTION D'UNE SITUATION DE CRISE APRES UNE CONTAMINATION
RADIOACTIVE A GRANDE ECHELLE**

Driemaandelijkse periodiek

Périodique trimestriel

2400 MOL 1

2400 MOL 1

ANNALES
DE
L'ASSOCIATION BELGE
DE
RADIOPROTECTION

Hoofdredacteur

Dr M.H. Faes
Fazantendreef, 13
B- 3140 Keerbergen

Rédacteur en chef

Redactiesecretariaat

Mme Cl. Stiévenart
Av. Armand Huysmans 206, bte 10
B- 1050 Bruxelles - Brussel

Secrétaire de Rédaction

Publikatie van teksten in de Annales
gebeurt onder volledige verantwoorde-
lijkheid van de auteurs.

Nadruk, zelfs gedeeltelijk uit deze
teksten, mag enkel met schriftelijke
toestemming van de auteurs en van
de Redactie.

Les textes publiés dans les Annales
le sont sous l'entière responsabilité
des auteurs.

Toute reproduction, même partielle,
ne se fera qu'avec l'autorisation
écrite des auteurs et de la
Rédaction.

Annales de l'Association belge de Radioprotection -
Vol. 24, N° 4, 1999

Ce numéro contient les textes d'exposés présentés
le 5 novembre 1999 lors d'une réunion organisée à
Bruxelles conjointement par l'Association belge de
Radioprotection et la Société Française de
Radioprotection consacrée à :

Annalen van de Belgische Vereniging voor
Stralingsbescherming Vol. 24, N° 4, 1999

Dit nummer bevat de teksten van de
uiteenzettingen gedaan in Brussel op 5 november
1999 ter gelegenheid van een gemeenschappelijke
vergadering van de Belgische Vereniging voor
Stralingsbescherming en de "Société Française de
Radioprotection" gewijd aan :

Crisis management after an extensive radioactive contamination

Gestion d'une situation de crise après une contamination radioactive à grande échelle

SOMMAIRE

INHOUD

Emergency plans in Belgium: the challenges of a high scale contamination J.-J. Van Binnebeek	p. 185
Plans d'urgence en France Préfet J. Deschamps Texte non disponible	p. 197
Présentation du code ASTRAL Ch. Mourlon	p. 199
Expérience et évaluation des codes de calcul de doses actuels utilisés en temps de crise nucléaire A. Sohier	p. 209
Use of GIS in the radioecological research of the chernobyl exclusion dose A. Arkhipov A.Ischuk, V.Nagorsky, N.Arkhipov, N.Kuchma, Yu.Ivanov, S.Paskevich	p. 229
Application of countermeasures to mitigate the consequences of large-scale radioactive contaminations A. Vandecasteele, L. Sombré , J.-M. Lambotte	p. 259
Gestion et analyse des mesures "terrain" en situation de crise nucléaire* J.-M. Métivier Texte complet non disponible - (publié dans Annales 25, N°1,p.71-90)	p. 283
Countermeasures after Chernobyl: impact, evaluation and lessons V. Davydchuk	p. 285
References for Decision aiding techniques (DAT)	p. 293
List of participants	p. 295

EMERGENCY PLANS IN BELGIUM: THE CHALLENGES OF A HIGH SCALE CONTAMINATION

J. J. Van Binnebeek

AVN-Brussels

Abstract

After an overall sketch of the general structure of the National Belgian Emergency plan and of the specific plans of the intervening institutions, the presentation will discuss the specific actions to be taken in case of highly spread contamination.

This will deal first with the assessment of the situation, using predictions and measurements including the use of the TELERAD system.

Taking account of the Belgian specificity (densely populated small country), it will address the various countermeasures to be taken in the short term as well as in the long term, their time schedules, and various specific actions which should be prepared in order to achieve effectiveness. In particular information aspects, urgent countermeasures, access control to contaminated areas, problems of contamination/decontamination, personnel turnover, human problems will be discussed.

Who is who?

- National Report for the International Convention on Nuclear Safety for NPP's (See www.avn.be)
 - Ministries: Regulatory Authority
 - AVN: Regulatory Organisation
- Roles of AVN
 - NPP + Other large nuclear installations
 - Safety assessment
 - Conformity checks (commissioning)
 - Inspections in operation
 - Decommissioning
 - Advisory role as expert in Evaluation Cell of Crisis Centre

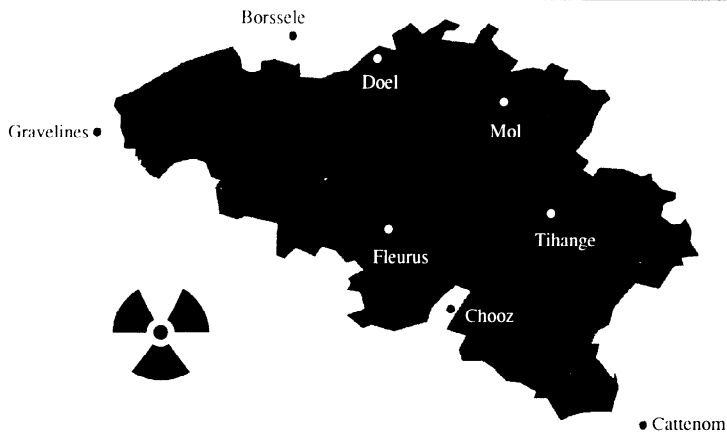
Content of the presentation

- General presentation of the Belgian Nuclear Emergency Plan
- Conditions for effective operation of a Nuclear Emergency Plan
- Specific aspects related to widespread contaminations
- Experience from Specific Exercises
- Related Challenges
- What to do to be prepared?
- Objectives
 - Try to be practical
 - Try to anticipate what would really happen in the reality

The Belgian Nuclear Emergency Planning and preparedness (BNEPP)

- Scope and objectives
- Overall structure
- Overall philosophy and characteristics

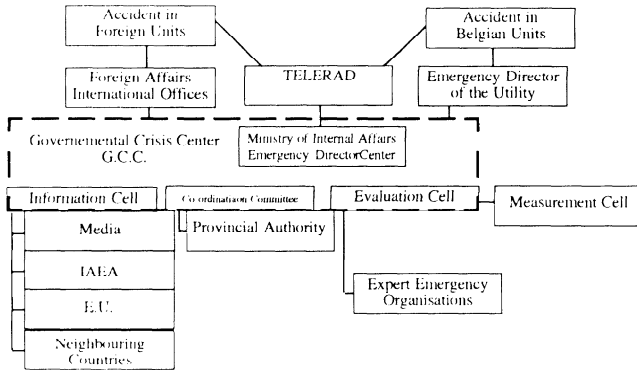
Emergency Plan for Nuclear Risks on the Belgian Territory



Belgian Nuclear EPP

- Scope
 - Accident on one of the Belgian sites
 - Accident in a neighbouring plant
 - Any other radiological emergency
- Objective
 - Definition of missions and responsibilities of intervening organisations
 - Guide for measures to be taken in order to protect the population a,d, the environment
 - No prejudice for normal duties of all concerned organisations

Emergency Planning Organisation in Belgium



Overall philosophy

- Evolutionary accident, BUT possibility to cope with fast accidental behaviour
- Utility responsible
 - for accident management on the site
 - For early information & measurements
 - Outside the site, authorities responsible for counter-measures
 - Federal responsibility → Governmental Co-ordination Crisis Centre

Overall Characteristics

- Centralised co-ordination through a decision centre with advisory cells with own composition (external expertise with own emergency plan), procedures, training
- Decentralised implementation of decisions on provincial or municipal level, with own emergency plan
- Bypass of centralised structure when urgent protective measures must be taken in case of sudden accident affecting the public
- Utilities with own emergency plan and specific duties (e.g. information & early measurements)
- All plans communicated for approval to Ministry of internal affairs

Conditions for Effective Operation of EPP

- Requirements
 - Infrastructure, resources (including changeover), communication
 - Preparation of flexible organisation capable to cope with unforeseen situations (decision making flexible)
 - Preparation of simple & clear procedures to address actions to be taken under stress by interveners
 - Indoctrination of interveners to believe in emergencies
 - Information & Training of Intervenors, Public and Media
 - Test all the facets of the organisation (exercises) in various conditions
- Each entity or organisation intervening at any level in the plan must have an emergency organisation addressing the previous aspects

Wide-spread contaminations Assessment

- Determination of the extent of the contamination
 - Calculations: very coarse w.r.t. levels; prediction only
 - Measurements:
 - Overall surveillance: TELERAD
 - Feasibility of fine measurements for countermeasures (cars,...); time necessary; where to measure?
 - Laboratories (→ transport of samples → delays)
 - What if measurement <> calculations?
- Estimation of risk evolution for anticipation

Wide-spread contaminations Countermeasures - Categories

- Short term (emergency phase)
 - Delimitation of & access control to contaminated areas
 - Confinement, Iodine tablets, evacuation, preventive actions on Food chain
- Longer term (later phase: plume away)
 - Food chain & people relocation
 - Care of irradiated/contaminated persons → Care institutions
 - Decontamination/fixation of activity (→ Waste!)
 - Attention for "re-suspension" & spreading of activity
 - To be planned in advance

Wide-spread contaminations Countermeasures - Key of success

- Prior information and training of interveners
- Prior information (and training) of public and media
- Decision guidance necessary (how to take countermeasures w.r.t. wind direction,...)
- Clear & honest information of Public/Media → Trust
, especially during the short term phase

Experience from Specific Exercises National exercises in the field

- Difficulty to integrate measurements in an overall picture
- Difficulty to translate technical data for decision makers
- Early information of local or field interveners to avoid uneasiness
- Stress → keep actions simple
- Use tools giving answers adequately related to countermeasure action levels (averted doses on appropriate integration times)
- Importance of communication within the interveners as well as with the public/media/decision makers

Experience from Specific Exercises Exercises in class rooms (Elicitation exercises)

- Simulation of accident conditions and of measurements
- Simulation of all parties involved (except real plant contact)
- Very usefull to understand each party's perception
- Necessary to prepare evaluation, communication & decision making procedures
- Side effects:
 - How to make account of non radiological factors (economy,...)?
Prepare data in advance
 - Avoid sending flight of aircrafts through the plume
 - Need to know more on feasibility of measures
- Computerised decision matrix not easy.

Feasibility of the counter-measures the challenges

- Highly populated country
- Adequacy of resources
 - Central & local organisations and infrastructures (Province,commune)
 - Communication
 - Actors (Police, Civil protection, Military, Hospitals, Experts) + changeover & transportation
 - Tools: measurement, transportation, decontamination
- Feasibility: control of contaminated areas
- Phychological aspects
 - Prier information of public & media: necessary, but not sufficient
 - Panic
 - Potential separation of family members
 - Lack of trust in the authority

What to do to be prepared? (1)

- Organisational developments
 - Plans for each organisation
 - Resources: material & human, incl. xhangeover
 - Entities & cells: reflections and procedures
 - International contacts & agreements (national/local) + tests
- Information e.g. KI campaign: Public, Media, interveners)

What to do to be prepared? (2)

- Training
 - Psychological training of interveners to emergency situations (believe & be ready)
 - Theoretical training adapted to each category of interveners
 - Exercises for interveners (for procedures development, Partial, Full)
 - Exercises involving the public & Media (Psychology!)
 - Problem of training of "all possible" actors
- Tools
 - Simulation codes (e.g. RODOS) during the preparation phase
 - Simplified calculation tools during the response phase
 - Measurement strategy
 - Decision making process
 - Tests, exercises

Conclusions

- Emergency Situation = War situation
- → Military parallelism:
 - Paramount importance of communication
 - Procedures in advance + flexibility/initiatives in the field
 - Defence in depth
 - Training + Drill
- Communication with public/media/decision makers

Samenvatting

Na een korte beschrijving van het nationaal noodplan en de specifieke plannen van de betrokken instellingen, wordt overgegaan tot de discussie van de specifieke maatregelen die moeten getroffen worden wanneer de besmetting op grote schaal verspreid is. Eerst wordt het evalueren van de omstandigheid aan de hand van projecties en metingen, met inbegrip van het gebruik van het TELERAD systeem, toegelicht.

Met het oog op een grote doeltreffendheid en rekening houdend met de grote bevolkingsdichtheid, worden de tijdsplannen van de mogelijke en specifieke tegenmaatregelen op korte en lange termijn besproken: in het bijzonder de informatiestroom, de dringende tegenmaatregelen, de regeling van de toegang tot de besmette gebieden, het uitwisselen van het personeel, en contaminatie / decontaminatie gebonden problemen.

Résumé

La structure du plan national d'urgence et les plans spécifiques des institutions sont brièvement présentés. Suit une discussion des contre-mesures spécifiques requises dans le cas d'une contamination étendue. L'évaluation de la situation est d'abord présentée sur la base des modèles de prédiction et des mesures effectuées de même que le système TELERAD.

Le déroulement des contre-mesures à prendre, à court et long terme, est ensuite commenté en tenant compte de la densité élevée de la population en Belgique. Sont évoqués en particulier, la circulation de l'information, les mesures urgentes, le contrôle de l'accès aux zones contaminées, la rotation du personnel, les problèmes de contamination/décontamination.

PLANS D'URGENCE EN FRANCE

Préfet J. Deschamps

(SGCISN-Paris)

Résumé

Les plans d'urgence prévus en France vis-à-vis du risque présenté par les installations nucléaires (centrales, usines du cycle du combustible, installations nucléaires de bases secrètes) sont appelés plans particuliers d'intervention (PPI).

Ceux-ci sont déclenchés par le préfet du département afin de prendre les dispositions de protection des populations (prise de comprimés d'iode stable, mise à l'abri, évacuation) contre les conséquences immédiates ou différées d'un accident pour lequel le plan d'urgence interne (PUI) de l'installation aura, bien entendu, été déclenché par l'exploitant.

Ces plans font appel à une organisation des pouvoirs publics à la fois au niveau local et au niveau national qui sera décrite.

Les nombreux exercices qui sont faits - qu'ils soient de sûreté nucléaire ou de sécurité civile - ont conduit à lancer une réflexion sur leur évolution pour les rendre plus opérationnels afin notamment de tenir compte de l'absence, dans les premières heures, d'une expertise autre que celle de l'exploitant et d'une très forte pression médiatique.

Au-delà de la phase d'urgence, c'est-à-dire lorsque les rejets radioactifs sont terminés, le panache dissipé et l'installation maîtrisée, nous entrons dans une phase dite post-accidentelle qui fait actuellement l'objet de nombreux examens dans des domaines tels que la consommation et la commercialisation des produits agricoles, l'intérêt d'entreprendre des études épidémiologiques, l'indemnisation des préjudices subis.

Quelques éléments d'information seront donnés sur les plans de secours spécialisés pour les transports de matières radioactives (PSS - TMR).

Samenvatting

De noodplannen voor nucleaire installaties worden in Frankrijk "PPI", "plan particulier d'intervention", genoemd. Het inzetten ervan omvat maatregelen zoals het uitdelen van KI tabletten, het schuilgaan en de ontruiming beogen de onmiddellijke bescherming van de bevolking wordt door de Préfet beslist wanneer andere maatregelen in het kader van een "PPU", "plan d'urgence interne", door de

exploitant genomen worden. Deze noodplannen doen beroep op de bestaande openbare structuren zowel op het lokaal als op het nationaal vlak.

De talrijke oefeningen, gedaan zowel op het gebied van de nucleaire als ook burgerlijke zekerheid, hebben geleid tot een verder overleg om de doeltreffendheid te verbeteren, vooral tijdens de periode kort na het ongeval wanneer nog geen andere informatie beschikbaar is dan deze van de exploitant en men toch zeer onder druk wordt gezet door de media.

Na de acute fase, d.w.z., wanneer er geen lozingen meer gebeuren en de exploitant weer volledig de installatie onder controle heeft, dient er aandacht besteed te worden aan de maatregelen die tijdens de zogenaamde post-accidentele periode moeten genomen worden in verband met de consumptie en het commercialiseren van voedingsmiddelen, epidemiologische aspecten, schadevergoeding, etc.

Er wordt ook kort ingegaan op de problematiek van de gespecialiseerde hulpverlening bij ongevallen tijdens het vervoer van radioactieve stoffen. ("PSS-TRM": "plan de secours - transport matières radioactives").

Abstract

The existing urgency plans for a nuclear installation are called "PPI, "plan particulier d'intervention".

It is activated by the Préfet of the "département" in order to protect the population against the immediate and delayed consequences of a nuclear accident for which the nuclear facility operator has launched his "PUI", i.e. de facility's internal urgency plan. The former includes actions such as the distribution of iodine tablets, sheltering and evacuation. These plans rely on the public means available at the local and national level. The numerous exercises performed for civil and nuclear security have led to a reappraisal aiming at improving the operational features, in particular during the first few hours after the accident, when little expertise other than that of the facility operator is at hand and pressure of the media is heavy.

After the acute phase, i.e. when there are no more releases, the plume has dissipated and the facility operation is again fully controlled, the post-accidental period starts to which a lot of and attention is given at present: Banning of food consumption and trading, epidemiological studies, damage compensation.

Some information is provided about the specialised aid plans in case of road accidents involving nuclear materials: the so-called "PSS-TMR": "plan de secours-transport matières nucléaires".

Présentation du code ASTRAL

Ch. Murlon

(IPSN -Cadarache)

Résumé

Lors d'une situation de crise après une contamination radioactive à grande échelle, les experts et décideurs des centres de crise veulent pouvoir évaluer la contamination des milieux et des produits alimentaires, en déduire l'exposition potentielle des populations aux rayonnements ionisants, prévoir l'évolution de la situation et proposer différents scénarios de gestion des zones contaminées. Le logiciel ASTRAL (**A**ssistance **T**echnique en **R**adioprotection post-**A**ccidentelle) répond à ces demandes, à partir des estimations ou des mesures d'un dépôt de radionucléides sur le sol: il calcule l'évolution des concentrations dans les éléments de la chaîne alimentaire et les doses efficaces dues à l'exposition externe et interne. La prise en compte de contre mesures permet d'évaluer l'efficacité de différentes gestion des zones et produits contaminés, ce qui permet de l'utiliser comme outil d'aide à la décision.

1 Introduction (Transparent 1)

ASTRAL est un acronyme pour « Assistance Technique en Radioprotection Post-Accidentelle ». Si un rejet important de radionucléides dans l'environnement se produisait, il faudrait rapidement estimer la concentration des radionucléides dans les écosystèmes et les produits alimentaires de l'homme, en déduire l'exposition potentielle aux rayonnements des populations concernées, prévoir l'évolution de la situation et proposer différents scénarios de gestion des zones contaminées.

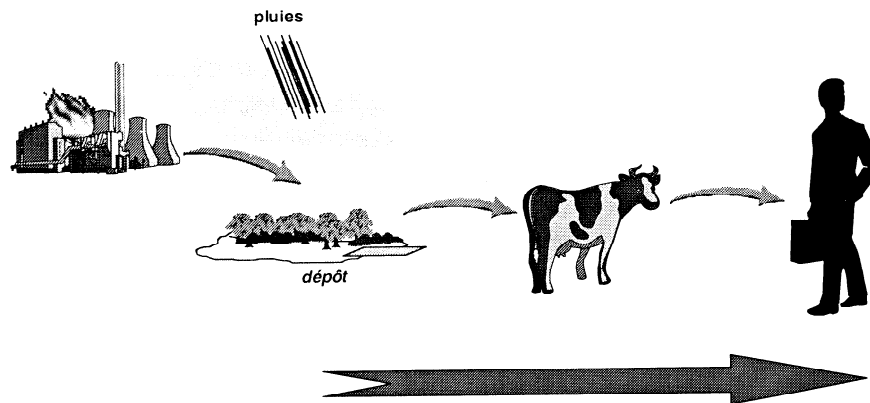
Le logiciel ASTRAL a été créé à ces fins, pour un ensemble relativement large d'agents gréant les centres de crise ou réalisant des études prévisionnelles d'impact. Il traite de la contamination suite à un rejet atmosphérique aigu, c'est à dire sur une période de rejet courte, de l'ordre de la journée. Le point de départ des estimations est le dépôt sur le sol des radionucléides, qui peut être fourni soit par un code de dispersion atmosphérique, soit par des mesures effectuées sur le terrain. Les conséquences de l'exposition au nuage ne sont pas traitées ici; les calculs effectués concernent à la fois l'évolution dans le temps des concentrations des radionucléides dans les éléments de la chaîne alimentaire et l'évaluation des doses efficaces¹ dues à l'exposition externe et interne suite aux dépôts.

¹ Le terme générique de « dose » est employé pour quantifier l'impact de rejets radioactifs sur l'homme. En réalité, ce terme recouvre un ensemble de concepts qu'il convient de définir.

La dose absorbée, exprimée en gray (Gy), est la quantité d'énergie absorbée par unité de masse de matière ; par définition $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J.kg}^{-1}$.

La dose équivalente reçue par un tissu ou un organe, exprimée en sievert (Sv), est le produit de la dose absorbée par un facteur de pondération caractéristique du rayonnement. Elle a été introduite car pour une même dose absorbée, l'effet de l'exposition dépend de la nature et de l'énergie du rayonnement ayant délivré la dose.

ASTRAL : ASsistance Technique en Radioprotection post-Accidentelle



2 Rappel des voies de contamination des produits agricoles (Transparent 2)

En ce qui concerne les produits végétaux, le transfert du dépôt aux plantes peut se faire au travers des feuilles dans le cas d'un dépôt direct ou, dans une moindre mesure, dans le cas d'une remise en suspension de radionucléides déposés au sol. Si les plantes ne sont pas en place au moment du dépôt, le transfert se fait essentiellement par une incorporation via le système racinaire des radionucléides contenus dans le sol. Une contamination consécutive à un transfert foliaire du dépôt direct est de loin plus pénalisante que la contamination par transfert racinaire. La connaissance du stade végétatif des plantes au moment du dépôt, en particulier la connaissance des calendriers agricoles des cultures (dates de labour, de germination, de récolte), est essentielle pour déterminer la voie de transfert et évaluer les niveaux de contamination.

En ce qui concerne les produits animaux, la contamination peut se faire par ingestion d'aliments, de terre et d'eau contaminés, ainsi que par inhalation de particules du dépôt remises en suspension. Seule la voie d'ingestion d'aliments est prise en compte, car elle est

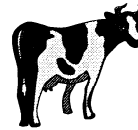
La dose efficace, exprimée en sievert, est la somme des doses équivalentes reçues par tous les organes, pondérées par un facteur de pondération caractéristique des tissus. Elle a été introduite, pour les cas d'une exposition simultanée de plusieurs organes ou tissus, car pour une même dose équivalente, la gravité de l'effet et, plus généralement, le détriment sur la santé, dépend du tissu ou de l'organe exposé.

Produits agricoles : voies de contamination

- Produits végétaux :
 - transfert foliaire
 - transfert racinaire



- Produits animaux :
 - ingestion d'aliments contaminés



importance de la date de dépôt, des calendriers agricoles et d'affouragement

considérée comme la plus significative. Le paramètre le plus influent sur la contamination des produits animaux est le calendrier d'affouragement, qui est encore un paramètre contextuel. En effet, celui-ci détermine en fonction de la date, les aliments consommés et donc les activités incorporées par les animaux : ces derniers peuvent être au pâturage ou recevoir des aliments (maïs ensilé, foin...) plus ou moins, voire pas du tout, contaminés selon la date du dépôt par rapport aux cycles végétaux concernés.

Le problème posé est celui de la connaissance de ces calendriers agricoles et d'affouragement pour le lieu et la date de l'accident. Les valeurs par défaut renseignées par ASTRAL sont des moyennes qui peuvent au mieux être ventilées par région, mais l'apport d'informations venues du terrain, pour confirmer ou corriger ces valeurs, sera déterminant pour évaluer au mieux la contamination des produits agricoles en cas de crise.

3 Rappel des voies de contamination de l'homme (Transparent 3)

Dans le cadre de la phase post-accidentelle, c'est à dire après le passage du panache (dont les conséquences, liées à l'exposition et l'inhalation, ne sont pas traitées ici), trois voies de contamination de l'homme sont prises en compte :

- l'exposition au dépôt,
- l'inhalation de particules du dépôt remises en suspension,
- l'ingestion d'aliments contaminés.

L'homme : voies de contamination

- externe : exposition au dépôt



- interne :

- inhalation de radionucléides remis en suspension



- ingestion de denrées contaminées



importance du mode de vie

Les incorporations et les doses sont obtenues par la définition de scénarios d'exposition qui traduisent le mode de vie et les caractéristiques des individus étudiés : temps de présence à l'intérieur et à l'extérieur des habitations, débits respiratoires, régimes et habitudes alimentaires, degré d'autarcie... Ces paramètres ont des valeurs renseignées par défaut, qui peuvent être modifiées par l'utilisateur. A dépôts et à niveaux de contamination d'aliments équivalents, ce sont ces paramètres qui importent pour évaluer les doses reçues sur une période par un individu.

4 Principaux calculs effectués par ASTRAL (Transparent 4)

A la suite d'un rejet accidentel de radionucléides dans l'atmosphère, la composition des dépôts sur le sol varie en fonction de la zone géographique considérée. Des « zones d'étude » sont définies, constituées d'entités géographiques (communes, régions agricoles, départements) sur lesquelles les dépôts sont considérés comme identiques. Pour une zone d'étude, ASTRAL effectue des calculs relatifs à la contamination de produits agricoles et alimentaires et relatifs à la contamination de l'homme.

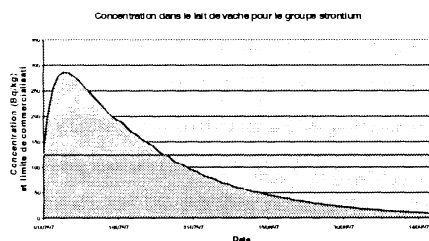
5 Critères d'évaluation de l'impact radioécologique et dosimétrique (Transparent 5)

Pour la gestion d'une situation de crise, les valeurs calculées de concentration, d'activité incorporée et de dose efficace ne suffisent pas aux décideurs pour évaluer le niveau de contamination atteint. Les résultats doivent être présentés de façon plus «communicante», afin de faciliter l'évaluation de l'impact radioécologique sur le milieu agricole et de l'impact dosimétrique sur les populations des zones géographiques concernées. Dans ASTRAL, ceci est fait par une comparaison des valeurs calculées à des valeurs de référence, réglementaires par exemple.

Pour les produits agricoles, les concentrations sont comparées aux limites de commercialisation définies dans le Journal Officiel CCE du 22/7/1989. Ces limites apparaissent sur les courbes d'évolution de la concentration et un indice de concentration est calculé par le rapport entre la concentration et la limite de commercialisation. Ceci permet de repérer rapidement les périodes et les récoltes pour lesquels des problèmes peuvent se poser. Par ailleurs, à partir des données agricoles relatives aux entités géographiques de la zone d'étude, les quantités affectées par différents niveaux de contamination, définis par ces indices de concentration, sont calculées.

Critère d'évaluation de l'impact post-accidentel

- Produits agricoles :
 - concentration / limites de commercialisation



- quantités concernées, ventilées par niveau de contamination

- Homme : incorporations sur une année / LAI
(Limite Annuelle d'Incorporation)

Pour l'homme : les incorporations annuelles de radionucléides par ingestion de denrées contaminées sont comparées aux limites annuelles d'incorporation, définies dans le Journal Officiel de la République Française du 6 mai 1988 et permettent d'introduire des indices d'incorporations. Ceux-ci facilitent la perception de l'importance de la situation radiologique.

6 Simulation de contre-mesures (Transparent 6)

Un des intérêts de l'outil ASTRAL est de permettre la simulation d'un certain nombre de contre-mesures agricoles ou sanitaires.

En effet, l'utilisateur peut envisager des modifications de pratiques agricoles, destinées à réduire les concentrations dans les produits : par exemple emploi d'engrais pour les grandes cultures, pratique de labours profonds, retrait de vaches laitières du pâturage, *etc* ... De même, des contre-mesures sanitaires, comme des interdictions de consommation de certains aliments, peuvent être prises pour diminuer la dose reçue par l'homme.

Les résultats obtenus avec ces nouveaux *scenarii* sont comparés à ceux que l'on obtiendrait sans l'adoption de contre-mesures : les courbes de concentrations avec ou sans contre-mesure sont représentées sur le même graphe, des calculs de doses évitées sont effectués pour les

Contre-mesures

Application possible de contre-mesures agissant sur :

- la contamination des produits agricoles et alimentaires
- l'exposition de l'homme

⇒ observation du « gain » obtenu sur les concentrations, les doses

périodes étudiées... Cette présentation des résultats permet aux décideurs de juger du « gain » obtenu par un jeu de contre-mesures, et de comparer différents *scenarii* de gestion de la situation post-accidentelle.

7 Conclusions : ASTRAL, un outil d'aide à la décision et d'apport d'information (Transparent 7)

Ainsi, l'outil ASTRAL permet d'évaluer l'impact radioécologique sur les produits agricoles et dosimétrique sur l'homme d'une situation post-accidentelle, de prévoir l'évolution de cette situation à moyen terme et de simuler différentes gestions des zones contaminées par l'application de contre-mesures. Ces résultats apportent aux décideurs des informations qui pourront l'aider à choisir des *scenarii* d'intervention et à répondre aux questions de la population et des médias.

ASTRAL : un outil d'aide à la décision,
et d'apport d'information

- évaluation de l'impact radioécologique et dosimétrique en post-accidentel,
- prévision de l'évolution de la situation
- *essai de scenarii* d'intervention par contre-mesures

Abstract

During the crisis situation resulting from a wide spread radioactive contamination, the experts and decision makers have a need to evaluate the environmental contamination as well as that of the foodstuffs in order to assess the possible exposure of the population and its time trends. The final aim is to propose a variety of management scenarios for the contaminated zones. The ASTRAL software (**A**ssistance **T**echnique en **R**adioprotection post-**A**ccidentelle) meets these requirements on the basis of measurements or estimations of the radionuclides deposition: the code provides previsions on the fluctuations to be found in the links of the food chain and gives the effective doses due to the external and internal exposure. The code takes countermeasures into account and this allows the evaluation of the efficiency of the measures and the handling of contaminated produce. It thus is a tool in the decision making process.

Samenvatting

Na een zwaar nucleair ongeval moeten de experts en de beslissingsnemers in het hoofdkwartier kunnen beroep doen op hulpmiddelen om de besmetting van het milieu en van de voedingsmiddelen te beoordelen, om er de mogelijk blootstelling van de bevolking uit af te leiden en om over een waaier van scenario's te beschikken. De ASTRAL code (**A**ssistance **T**echnique en **R**adioprotection post-**A**ccidentelle) komt deze eisen tegemoet aan de hand van metingen en ramingen van het radioactieve neerslag. De code geeft de evolutie van de concentratie in de levensmiddelen en de externe en interne stralingsdosissen. Door de tegenmaatregelen mee in rekening te brengen, kan de doeltreffendheid van de verschillende beheer scenario's voor de voedingsmiddelen en de besmette zones getoetst worden. Dit maakt van de code een werktuig voor het nemen van beslissingen.

Expérience et évaluation des codes de calcul de doses actuels utilisés en temps de crise nucléaire

A. Sohier

Centre de recherche sur l'énergie nucléaire (SCK•CEN)
Division Radioprotection
Boeretang 200
B-2400 Mol
asohier@sckcen.be

Résumé

Selon la législation belge en la matière, l'exploitant nucléaire est obligé d'effectuer des calculs de doses et des conséquences prévues pour les populations avoisinantes en cas de crise nucléaire et de transférer ces résultats vers les autorités compétentes. En consultation avec ces autorités plusieurs codes relativement simples ont été développés pour les divers sites nucléaires belges, p.ex. le Plan d'Urgence Campine et le Plan d'Urgence Doel/Tihange, principalement pour évaluer les conséquences à court terme et à courte et moyenne portée dans le but de déterminer et motiver le choix d'une stratégie d'intervention urgente. Un aperçu des divers modèles, de leurs sources d'information et de leur philosophie de base est donné. L'expérience de l'utilisation de ces codes durant les exercices est présentée, suivi d'une discussion qualitative des incertitudes liées à l'utilisation des modèles et de la problématique de la comparaison entre les mesures radiologiques sur le terrain et les prédictions numériques. Quelques suggestions pour une meilleure intégration de ces différentes sources d'information seront faites.

Finalement une brève discussion sera faite sur les conséquences organisationnelles de l'éventuel utilisation d'un code plus performant mais plus complexe tel que p.ex. RODOS, le nouveau logiciel européen pour l'aide à la décision.

Introduction

Vu que la Belgique est un pays fortement nucléarisé du point de vue civil, un plan d'urgence nucléaire a été défini au niveau fédéral pour faire face à d'éventuelles crises nucléaires afin de réduire au mieux les risques radiologiques sur la population et les conséquences d'une contamination du territoire. Les principes en sont décrits en [1].

Pour les principales installations nucléaires, une zone générale de planification d'urgence a été définie dans laquelle les modalités d'intervention en cas de nécessité sont élaborées en détail. Cette zone, ayant une étendue typique de 10 km pour les grandes installations, a été conçue pour un spectre d'accidents envisageables tenant compte de la nature de ces installations. Cependant aucune étude de détermination de risque probabiliste intégrant les deux premiers niveaux, c.à.d. de l'événement initiateur jusqu'aux termes sources n'a été effectuée. Même si les probabilités de termes sources catastrophiques associés à une fusion de cœur suivi d'une rupture précoce de l'enceinte donnant lieu à une contamination à grande échelle ne sont pas quantifiées, elles sont très faibles mais émanent néanmoins du possible. Un tel scénario pour un réacteur REP (Réacteur à Eau Pressurisé) de 1000 MW_{el} donnerait lieu à des conséquences prévues nécessitant, ne tenant compte que des critères

d'intervention radiologiques de vigueur en Belgique, des contre-mesures de confinement jusqu'à plusieurs centaines de km, d'évacuation sur des dizaines de km, d'ingestion de tablettes d'iode stable également jusqu'à des centaines de km et des contre-mesures agricoles sur de milliers de km et donc représentant un véritable défi pour une région à haute densité de population.

Dans la suite nous nous limiterons au traitement de l'intervention urgente.

Les principes internationaux d'intervention

Justification et optimisation

Faisant suite à l'introduction du concept d'intervention de la CIPR [2], [3] le premier principe stipule que toute intervention doit être justifiée et optimisée, autrement dit qu'il faut obtenir le plus de "bien" (bénéfice) possible contre le moindre "mal" (tort) que possible. Le "bien" se traduit d'habitude par un gain radiologique (c.à.d. une diminution de doses) et est, du moins de manière conceptuelle, quantifiable. Comme nous le verrons la quantification du gain radiologique est rendue difficile suite aux incertitudes importantes auxquelles l'on doit s'attendre en temps de crise. Le "mal" qui est plutôt d'ordre non radiologique, représente tous les effets néfastes de l'intervention sur le plan économique, social, psychologique (p.ex. acceptabilité), culturel et politique, et est de manière conceptuelle bien plus difficile à quantifier. Le réalisme des mesures à prendre doit également être tenu en compte. Pour faire face à ces difficultés, des niveaux guides radiologiques d'intervention ont été proposés par divers organismes internationaux et repris dans les législations nationales, tenant compte des conditions locales (p.ex. difficulté d'évacuer une grande ville). En cas de crise, ces niveaux sont éventuellement adaptés en fonction de la situation prévalante (p.ex. difficulté d'évacuation sous conditions météorologiques néfastes).

Effets déterministes

Une contrainte domine tout choix d'intervention : éviter d'éventuels effets déterministes. Pour cela des limites de doses absorbées aux différents organes ont été proposées [4]. Il faut donc faire une estimation de la dose absorbée projetée sur toute la durée significative de l'exposition, en considérant la sommation sur toutes les voies d'exposition pour un groupe critique de population n'étant sujet à aucun facteur de blindage.

Effets stochastiques

Souvent, mais pas toujours, le respect des niveaux d'intervention pour limiter le risque stochastique individuel va également assurer la satisfaction à la contrainte susmentionnée. A un moment où une décision doit être prise quant à une éventuelle décision d'intervention, c'est la *dose évitable* qui devra être comparée aux niveaux d'interventions [5]. En théorie cela signifie que l'on considère uniquement les doses encore à encourir, c.à.d. les doses futures, que l'on considère le mérite de chaque contre-mesure prise individuellement et seulement les voies d'expositions influencées par ces contre-mesures et que l'on fait la meilleure estimation que possible pour un membre typique de la population.

En tenant compte du principe de justification, ce cadre implique que l'on devrait donc d'abord considérer l'introduction des contre-mesures les moins pénalisantes du point de vue non radiologique (p.ex. confinement) et ensuite seulement l'éventuelle introduction de contre-mesures plus pénalisantes (p.ex. évacuation) à condition qu'elles permettent encore d'éviter suffisamment de dose. Ce cadre implique également que l'on devrait tenir compte de la différence des facteurs de blindage entre la vie normale pour un individu typique et ceux d'application durant la contre-mesure. La question subsiste

de savoir quel groupe de population définit la vie normale. S'agit-il de la majorité étant à l'intérieur et étant déjà sujette à un certain blindage ? Ou doit on faire la pondération sur les différents groupes de population sujets à différents taux de blindages ? Des simplifications s'imposent.

Niveaux guides d'intervention en Belgique

MESURE DE PROTECTION	NIVEAUX GUIDES D'INTERVENTION
Confinement général (max. 24 h)	5 – 15 mSv Corps entier ; intégré sur 24 h
Ingestion de tablette d'iode stable	50 mSv Thyroïde – inhalation ; malgré confinement
Evacuation générale	50 – 150 mSv Corps entier; intégré sur 2 semaines; malgré confinement

Le fait d'utiliser une fourchette pour les niveaux guides d'intervention tend à rendre une décision délicate suite à l'incertitude associée à l'évaluation des doses. Cependant une démarche en escalier est suivie à partir du niveau guide d'intervention inférieur. Ce niveau guide peut être rehaussé en cas de nécessité suivant les conditions prévalantes.

Pour juger sur la nécessité d'introduire des contre-mesures urgentes liées à la contamination de produits agricoles, des niveaux guides de référence non officiels de contamination surfacique sont appliqués, donnant lieu en saison estivale, selon un modèle de transfert simple, aux taux de contamination maximales des aliments selon la législation belge [6]. Ces niveaux sont de 4000 Bq/m² pour l'iode 131 et de 6000 Bq/m² pour le césium 137.

Le fonctionnement de CELEVAL

Globalement, la réalisation d'une stratégie d'intervention est un processus récursif d'analyse de la situation environnementale (réelle et prévue), d'un avis de décision sur l'intervention, de décision sur l'intervention à prendre, et finalement de l'exécution de l'intervention sur le terrain.

Dans le cadre du centre de crise gouvernemental la cellule d'évaluation (CELEVAL) est censée faire les évaluations radiologiques hors site nécessaires et passer des avis d'intervention au groupe de décision CORECO. CELEVAL est constitué de sous-groupes (s.g.) (p.ex. s.g. support évaluation technique (installation), s.g. évaluations radiologiques, s.g. météorologie, s.g. agriculture, s.g. monitoring), chacun responsable pour des tâches spécifiques. Une discussion globale permet de faire le point sur la situation radiologique hors site avant d'émettre un avis à CORECO.

Bien entendu, l'information provenant de l'installation affectée est de première importance. Après l'alerte et la convocation des membres de CELEVAL, c'est la mention initiale de l'exploitant supportée par un rapport d'état de situation qui lance le processus d'évaluation. Pour cela les formulaires d'état de la situation technique donnent de l'information cruciale sur l'état actuel de l'installation et sur les risques de dégradation. Ces formulaires sont basés sur 4 questions-réponses clefs portant sur :

- la criticité du réacteur ;
- l'inventaire en eau du circuit primaire ;
- le refroidissement effectif du cœur ;
- le confinement.

Ces informations sont transmises périodiquement en fonction de l'évolution, de même que l'information disponible sur les rejets et les actions prises sur le site.

De plus, l'exploitant est obligé de déterminer les conséquences radiologiques prévues en dehors du site. Il dispose d'un code de calcul pour la dispersion et l'évaluation des doses et il peut envoyer des équipes de mesure sur le terrain pour effectuer des mesures et prélever des échantillons.

Le code de calcul – centrale nucléaire de Doel

La plupart des principaux exploitants nucléaires en Belgique utilisent des codes de calcul basés sur les mêmes principes. Le code le plus récent et le plus polyvalent est celui de la centrale nucléaire de Doel. La discussion va donc se limiter à ce code. Le code a été conçu dans le souci de tenir compte du concept de dose évitable, mais d'une manière pragmatique.

Le programme fonctionne selon 3 modes principaux :

- le mode prévision ;
- le mode suivi en temps réel ;
- le mode extrapolation.

Le mode prévision

Le but premier du mode prévision est de faire des estimations radiologiques *avant* qu'un rejet ait eu lieu, ou du moins avant une nouvelle phase de rejet prévue.

Basé sur une méthodologie développée à EdF, toute une panoplie de situations accidentelles évolutives possibles pour les principales installations a été définie. Chaque situation représente un scénario accidentel qui est caractérisé par un certain rejet ou terme source type. La typologie des scénarios en fiches standards est basée sur des événements clefs, p.ex. :

- rupture circuit primaire – circuit primaire non contaminé – pas de dommages enveloppe-combustible ;
- rupture circuit primaire – fusion de cœur ;
- rupture de tube de générateur vapeur + rupture de conduite de vapeur dans l'enceinte – circuit primaire intact – dégagement via vapeur ;
- etc ... etc

En tout et pour tout on distingue plus de 100 scénarios par installation majeure.

Les termes sources associés sont établis sur bases d'hypothèses réalistes/conservatrices. Trois groupes de relâchement sont prévus :

- les gaz nobles ;
- les iodes ;
- les aérosols (césium 137 équivalent).

La composition relative dans un groupe dépend du temps prévu entre l'arrêt de la centrale et le début et la durée de l'émission.

Lors d'un incident l'opérateur choisit la fiche standard qui lui semble approcher au plus près la situation réelle, en fonction de l'information disponible. Il dispose d'un "logigramme-diagnostic" lui posant des questions clefs et lui permettant de naviguer jusqu'au choix final de fiche standard, p.ex. :

- si rupture du circuit primaire, quelle est la température du cœur? – circuit primaire contaminé? – by-pass de l'enceinte? – sprays du bâtiment réacteur actifs? – filtres opérationnels? – etc ... etc ...

Le choix fait, le terme source associé à la fiche standard est supposé être émis en une seule bouffée et suivi dans l'environnement selon les conditions météorologiques prévalantes ou prévues. Le code est couplé à un système de captage de données en ligne qui mesure en continu les principaux paramètres météorologiques, c.à.d. vitesse et direction du vent, classe de stabilité (par le biais des fluctuations horizontales du vent) et précipitation (1 ou 0).

L'opérateur a à tout moment la liberté de définir de nouvelles fiches standards avec des termes sources adaptés et de modifier les paramètres météorologiques, si bon lui semble.

L'émission est suivie hors site et les quantités intégrées suivantes sont calculées dans un grillage polaire s'étendant jusqu'à 50 km autour du point de rejet :

- doses (mSv) :
 - dose effective panache ;
 - dose effective inhalation ;
 - dose thyroïde (adulte et petit enfant) ;
 - dose effective dépôt (intégrée sur 24 h et 2 semaines) ;
 - dose effective totale (panache+inhalation+dépôt (24h et 2 semaines)) ;
- dépôts (Bq/m²) :
 - iode 131 et aérosols $\beta\gamma$ (équivalent césium 137) ;
- concentrations aériennes intégrées (Bq•s/m³) :
 - iode 131 et aérosols $\beta\gamma$ (équivalent césium 137).

Il est important de mentionner que, dans le mode prévision, on considère seulement l'impact futur du à une émission future, donc en principe seulement les quantités évitables.

D'autre part pour ne pas rendre l'interprétation des résultats trop difficile, il a été convenu durant la phase conceptuelle du code de ne pas considérer des facteurs de blindage pour un individu en plein air. Pour tout point de calcul, l'opérateur peut à sa guise demander un rapport détaillé par voie d'exposition et par groupe isotopique. De telle manière on peut, en dehors du programme, tenir compte de l'effet d'éventuels facteurs de blindage. Cette remarque reste valable pour les deux autres modes opérationnels.

Suite aux résultats calculés, certaines contre-mesures peuvent être proposées.

La présentation des résultats se fait dans le module rapports qui est intégré dans le mode prévision, cfr. infra.

Le mode suivi en temps réel

Le but premier du mode suivi est de suivre effectivement le rejet et son impact radiologique en temps réel par le biais du système de captage de données en ligne qui enregistre par pas de 10 minutes les émissions à la cheminée (gaz rares, iodes et aérosols β, γ , c.à.d. l'équivalent césium 137) et les données météorologiques, voir supra.

La composition relative isotopique pour les deux premiers groupes dépend de la durée de temps entre l'arrêt du réacteur et le début du rejet. Cette durée est un paramètre d'entrée du programme.

Par pas de 10 minutes une nouvelle évaluation peut être faite. Les quantités calculées sont celles d'application jusqu'à la période d'évaluation. Elles sont similaires aux quantités calculées dans le mode prévision, sauf que la dose due au dépôt n'est intégrée que jusqu'au moment d'évaluation.

Donc, seulement les doses et les contaminations déjà encourues suite aux émissions passées sont considérées. Les contributions futures dues aux émissions passées ne sont pas considérées.

De plus, les débits de doses (exprimés en mSv/h) pour la dernière période d'évaluation sont également calculés, de même que les concentrations (en Bq/m³) de l'iode 131 et du césium 137.

Le mode extrapolation

Le mode extrapolation doit être activé à partir du mode suivi en temps réel. A chaque moment l'utilisateur du code peut demander un calcul de l'effet intégré des émissions qui ont eu lieu jusqu'à présent, éventuellement combiné avec un rejet futur encore prévu.

Dans le premier cas l'utilisateur fait suivre les rejets qui ont déjà eu lieu par un rejet zéro. Il peut, si bon lui semble, modifier les dernières données météorologiques qui lui sont proposées. Toutes les bouffées sont alors suivies selon ces conditions météorologiques jusqu'en dehors du domaine de calcul.

Dans le second cas, au lieu d'introduire un rejet zéro il peut encore introduire trois phases successives de rejet de durées variables simulant au mieux sa prévision. Des phases de rejet zéro sont néanmoins également admises. Il doit aussi introduire les conditions météorologiques prévues pour chaque phase de rejet. S'il n'y a pas de changement de conditions météorologiques prévu, le rejet peut être comprimé en une seule phase. Durant la dernière phase toutes les bouffées sont suivies jusqu'en dehors du domaine de calcul selon les dernières conditions météorologiques introduites.

Les quantités intégrées calculées sont similaires à celles calculées au mode prévision. Mais maintenant deux ensembles de résultats sont présentés.

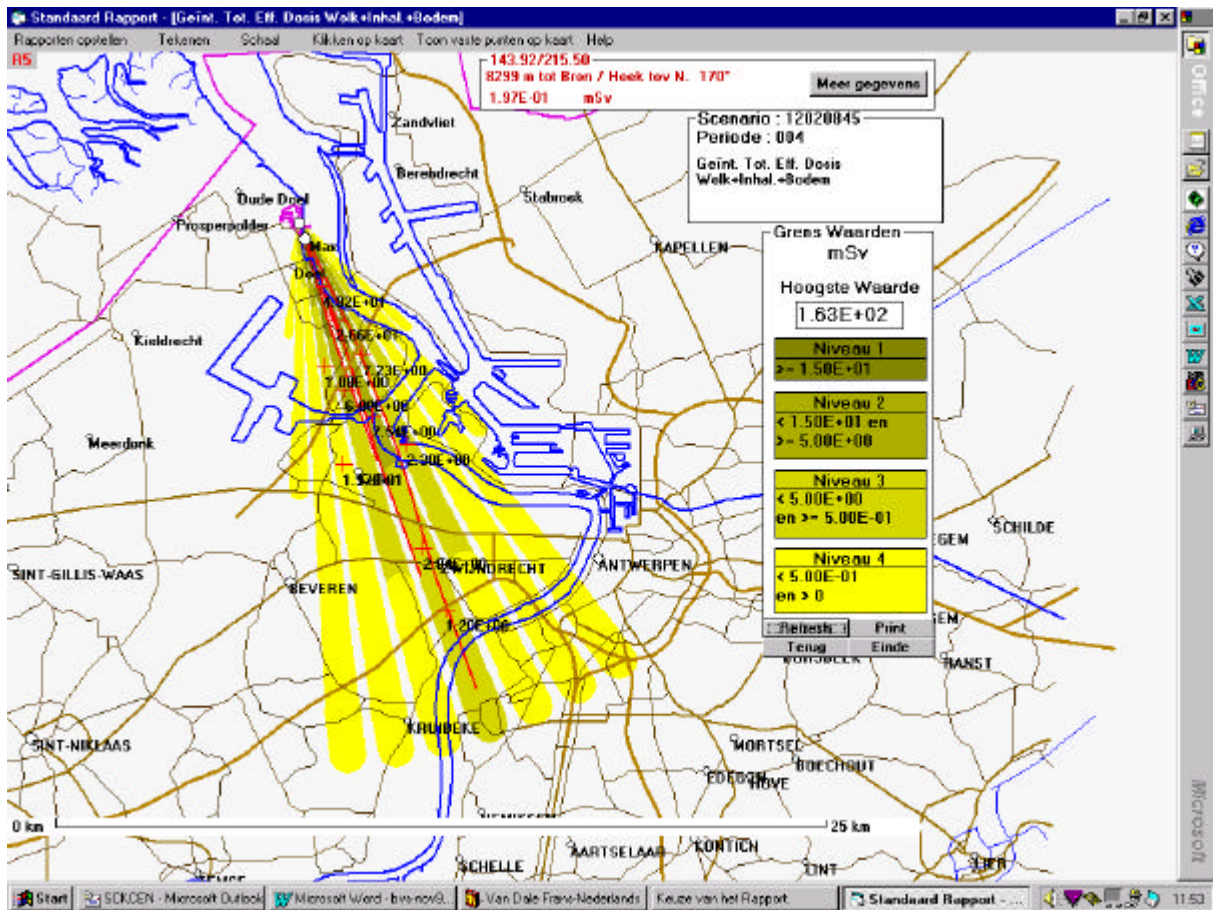
Le premier ensemble donne les quantités intégrées encore à recevoir au moment de l'évaluation, c.à.d. au moment de transition entre le mode suivi en temps réel et le mode prévision, suite aux émissions passées et futures et représente donc des quantités en principe encore évitables.

Le second ensemble donne les quantités intégrées totales, c.à.d. la somme des quantités déjà encourues au moment de l'évaluation et celles encore à recevoir, suite aux émissions passées et futures. Ces données sont nécessaires pour se faire une idée de l'impact total de l'accident.

Le module rapports

Le module rapports, similaire pour les trois modes, permet de faire des rapports sur mesure à la demande de l'utilisateur.

Premièrement, les différents champs de contamination calculés peuvent être présentés graphiquement en superposition avec l'information géographique des environs (jusqu'à 50 km) du site. Différents niveaux seuils, p.ex. ceux correspondants aux niveaux guides du plan d'urgence pour l'introduction de contre-mesures, permettent, pour les différents champs de contamination, de visualiser l'étendue du territoire ayant des valeurs supérieures à ces niveaux seuils. P.ex. la figure ci-dessous présente la dose effective totale pour un scénario fictif indiquant l'étendue sous, entre et au-dessus des niveaux guides de confinement.



Deuxièmement, comme déjà énoncé, l'utilisateur peut demander de l'information numérique détaillée, par voie d'exposition et par groupe isotopique, pour chaque point de calcul du grillage polaire et pour chaque point de calcul additionnel associé p.ex. aux centres de population ou aux points où des mesures peuvent être faites.

Actuellement les calculs sont, légalement, effectués par l'exploitant. A titre d'essai les résultats des calculs sont transférés électroniquement vers CELEVAL où le module rapport est installé. Cela permet aux membres du groupe d'établir des rapports complets et clairs selon les besoins. Cette manière de travailler sera probablement effectivement instaurée dans le futur.

Fiche technique

Vu la topographie simple, le modèle de dispersion est relativement simple, dit modèle gaussien segmenté. Les rejets sont suivis par pas de 10 minutes selon les conditions météorologiques successives, supposées valables simultanément pour tout le domaine de calcul, s'étendant jusqu'à 50 km du point de rejet. La définition de classes de stabilité et les coefficients de diffusion associés ont été déterminés lors d'expériences aux traceurs durant les années 70.

D'une manière conservatrice le modèle ne tient pas compte de l'appauvrissement dû aux dépôts. Concernant le dépôt sec, cela peut donner lieu à une surestimation après plusieurs km surtout pour un rejet au niveau du sol avec de l'iode sous forme gazeuse. Comme les précipitations ont souvent lieu sous forme d'averses, l'opposé pourrait conduire à de sensibles sous-estimations, p.ex. en cas de précipitations seulement à une certaine distance de la source.

Le modèle contient un sous-module pour modéliser la dispersion accrue en cas d'incendie.

Dans le mode suivi en temps réel, la décroissance radioactive est considérée à partir du moment initial de l'arrêt du réacteur.

Situations plus complexes

Le sous-groupe météorologie de CELEVAL obtient de l'information directe de l'Institut Royal Météorologique utile pour des situations plus complexes, tel que les vecteurs de vent en 3 dimensions, la détermination de trajectoires pour l'advection sur de longues distances, la détermination des couches d'inversion, les zones de précipitations et bien sûr les prévisions météorologiques.

Malheureusement, ces informations ne sont pas intégrées via un ensemble informatisé dans un modèle de calcul de dose ou de contamination et nécessitent donc des manipulations.

Incertitudes

Plusieurs types d'incertitudes rendent l'application d'un modèle plus ou moins incertaine.

Premièrement, il y a l'incertitude des modèles suite à leur inaptitude de représenter toute la complexité du monde réel (p.ex. en utilisant un modèle de panache pour une situation de vent calme ou en cas de topographie complexe). Cette situation peut être la suite d'une physique simplifiée, voir inadéquate, ou bien de la négligence de certains processus (p.ex. pas de surélévation du panache en cas d'un rejet énergétique).

Deuxièmement, même en cas d'une modélisation adéquate, souvent l'ignorance partielle des paramètres internes ou des paramètres d'entrée du modèle fait croître cette incertitude. En pratique ces deux types d'incertitudes sont corrélés (p.ex. la modélisation du dépôt et les paramètres associés). Les principaux paramètres d'entrée qui nous concernent sont :

- le terme source, c.à.d. quoi?, combien?, comment? et quand?
- les paramètres météorologiques, c.à.d. principalement l'advection, la diffusion et les précipitations.

L'incertitude liée au terme source peut facilement atteindre plusieurs ordres de magnitude et donc dominer l'incertitude. De là l'importance d'essayer d'estimer au mieux ce terme source, chose non aisée.

Suite aux effets non linéaires, la quantification des incertitudes liées à la plupart des paramètres est relativement difficile à effectuer. P.ex. une petite erreur dans l'estimation de la hauteur effective du panache peut donner lieu à de larges erreurs à courte distance du point de rejet. De même, une petite erreur dans la direction d'advection donne lieu à de larges erreurs dans l'estimation des valeurs calculées dans des points précis.

En principe un modèle doit être validé pour que l'on puisse l'utiliser avec un certain degré de confiance. En pratique les modèles ne sont généralement validés que statistiquement sous des conditions contrôlées et limitées (p.ex. des séries d'expériences aux traceurs). Il s'agit donc de

conditions diamétralement opposées à celles d'une situation accidentelle non contrôlée et unique. La question essentielle est de connaître la performance du modèle sous les conditions accidentelles spécifiques. Malheureusement cette question ne connaît pas de réponse simple.

L'utilisation adéquate d'un modèle représente donc un exercice difficile et ne peut être effectué à l'aveugle. Il est hautement souhaitable qu'un jugement de confiance sur les résultats proposés par le modèle soit exprimé par un expert humain. L'utilisateur qualifié a de plus la responsabilité de poser les bonnes questions au modèle. L'incertitude dans la réponse du modèle dépend également des questions posées. Il est souvent mieux de poser des questions plus globales que des questions trop précises qui donnerait lieu à des incertitudes inacceptables. A titre d'exemple, un modèle peut donner une estimation d'une dose en un endroit précis à un moment précis, mais avec une incertitude énorme non quantifiée. Dans ce cas il vaut mieux demander des doses intégrées sur un laps de temps suffisant, représentatives pour un secteur. L'utilisateur devra également formuler différentes hypothèses de travail, ayant directement un impact sur les données d'entrée. La combinaison de différentes sources d'information devrait pouvoir réfuter ou bien supporter certaines hypothèses.

A condition de tenir compte de ces écueils, un modèle de calcul de doses en temps réel reste un outil précieux et nécessaire.

Relations mesures – prédictions

Durant la phase préalable au rejet le modèle fonctionne en mode prévision et ne peut être confronté avec des résultats de mesures sur le terrain. Dans la phase de rejet, des mesures, limitées en nombre, prises sur le terrain seront graduellement disponibles. Vu les différentes sources d'incertitude énumérées ci-dessus il est très peu probable qu'il y aura une conformité simple entre prédictions et observations. D'autant plus que les champs de contaminations liés aux concentrations aériennes (débits de doses et échantillons aériens) sont sujets à de fortes et rapides fluctuations spatio-temporelles. Le responsable pour l'avis à la décision sera donc a priori confronté à la situation inconfortable de contradictions apparentes entre ces deux sources d'information distinctes, portant à confusion.

Pourtant prédictions et mesures restent nécessaires.

En première instance on peut affirmer qu'à priori les mesures donnent de l'information *locale* et *momentanée* sur le type de contamination mesurable (débits de doses, doses, échantillons aériens suivis d'analyse β ou γ , etc ...), alors que les modèles donnent la possibilité d'obtenir une vue intégrale (spatio-temporelle) et complète (tous les champs de contamination).

Stratégies de mesure

Sous certaines conditions il y a moyen de réduire quelques-uns de ces conflits apparents et d'essayer de tirer profit de la complémentarité de ces deux sources d'information. Il y a lieu de faire la distinction entre données quantitatives et données qualitatives.

Les données qualitatives peuvent en principe être utilisées pour calibrer certains paramètres clés du modèle. Ainsi l'utilisation de débits de doses gamma (DDG) peuvent améliorer l'estimation en temps réel du terme source global, c.à.d. non discriminé en nucléides. Les conditions sont la disponibilité de mesures DDG continues, simultanées, synchronisées, moyennes (sur p.ex. 10 min) et à densité "suffisante" transversalement à l'advection. Une étude de sensibilité détaillée [7] a démontré qu'il faudrait pour cela une balise au moins tous les 15 degrés. Cela n'est possible qu'en utilisant des balises fixes complétées de balises mobiles à lecture infrarouge ou à transmission par lien radio vers

une banque de données centrale. Une distance optimale est d'environ 1 km autour du point de rejet. Un tel prototype de logiciel a été développé dans le cadre du projet RODOS (voir infra).

Les données quantitatives ont plutôt rapport à la composition du rejet dans le but de déterminer sa radiotoxicité et sont d'habitude obtenues par échantillonnages de l'air (aérosols et iodes). Ces données doivent être utilisées conjointement avec des données qualitatives tel que DDG qui sont obtenues bien plus facilement.

Actuellement la mesure directe de la contribution des gaz nobles aux DDG n'est pas faite. Cependant la connaissance du rapport entre les différentes composantes majeures du rejet, c.à.d. gaz nobles – iodes – aérosols, permettrait de définir des corrélations plus strictes entre mesures et modèles. La spectrométrie γ en temps réel, incluant la contribution du panache, pourrait y contribuer. Ceci est déjà utilisé par endroits (Finlande) mais nécessite encore pas mal de recherche.

Le but est donc bien d'essayer d'obtenir suffisamment d'information par les mesures pour augmenter la fiabilité du modèle, et pour utiliser celui-ci subséquentement pour faire des extrapolations spatio-temporelles. Des hypothèses quant au déroulement futur du rejet restent néanmoins nécessaires.

Plus globalement, tout le domaine d'assimilation de données de tous types (incl. information et données sur l'installation affectée et jugements d'experts humains) aspire à améliorer la connaissance de la situation radiologique mais reste pour le moment encore dans le domaine de la recherche suite à sa haute complexité [9]. Les chances de succès ne sont pas garanties.

A noter que la détermination de la situation radiologique après le passage du panache est de manière conceptuelle bien plus simple. En principe la plupart des contre-mesures urgentes auront été prises et il y aura donc plus de temps disponible. Cependant les questions concernant des décisions sur une évacuation tardive, un déplacement de population, un éventuel retour de la population et l'interdiction de consommation de denrées alimentaires restent posées. Il s'agit donc de trouver les endroits les plus contaminés et d'y effectuer des mesures complémentaires pour déterminer la nature de la contamination. L'utilisation d'un modèle de dispersion se limite rétrospectivement à déterminer les endroits où une contamination significative est à prévoir et où des mesures devraient être effectuées pour obtenir l'information voulue. Une cartographie gamma par hélicoptère complétée par l'utilisation d'un véhicule de mesure sur le terrain semble la voie la plus rationnelle.

En pratique, pour des accidents de longue durée, il n'y aura pas de distinction claire et nette entre les actions de mesure et d'évaluation à prendre durant la phase de rejet et la phase post-rejet.

RODOS

Dans le cadre des programmes de recherche de la Commission européenne dans le domaine de la radioprotection, l'outil européen d'aide à la décision RODOS (RReal-time On-line DecisiOn Support System) a été élaboré. Le but poursuivi par la Commission était, suite à l'expérience de Chernobyl en 1986, de réaliser une certaine harmonisation des méthodologies d'évaluation et d'intervention en cas de crise nucléaire en Europe. RODOS est décrit en détails dans de nombreuses publications, p.ex. [10], et dans ce qui suit seulement quelques aspects de RODOS seront mentionnés dans le but de principalement indiquer la valeur ajoutée potentielle de RODOS par rapport aux outils actuels utilisés pour l'aide à la décision en Belgique.

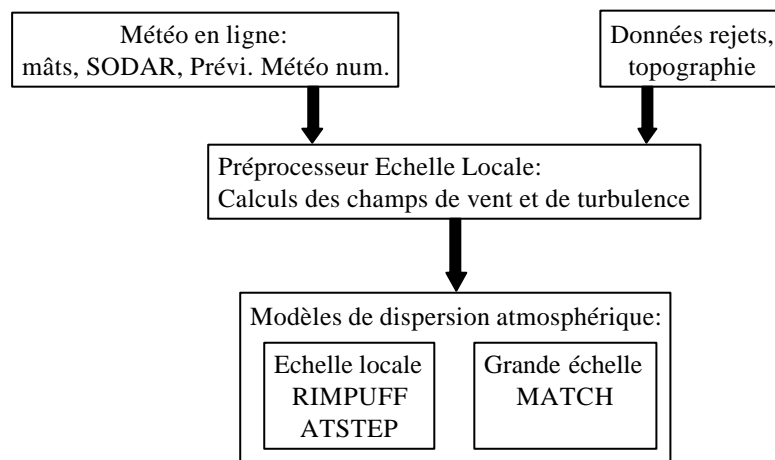
RODOS a été conçu pour traiter toutes les échelles spatio-temporelles d'un accident nucléaire, c.à.d. à partir des environs immédiats jusqu'à l'échelle du continent européen, depuis la notification de l'accident jusqu'au suivi à long terme.

Le système permet de travailler en ligne en temps réel, pour l'acceptation et l'utilisation d'une part de données météorologiques et de prévisions numériques météorologiques et d'autre part de données provenant de réseaux radiologiques (p.ex. balises au périmètre de l'installation).

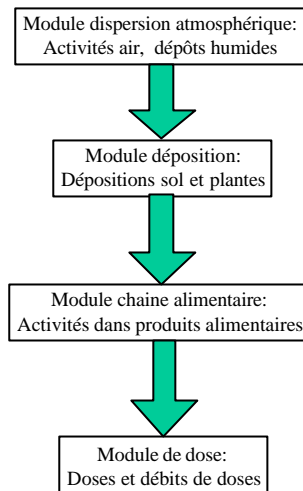
Quatre niveaux d'aide à la décision sont définis :

- niveau 0: acquisition et présentation de données radiologiques ;
- niveau 1: analyse radiologique sans contre-mesures ;
- niveau 2: simulation et effets de contre-mesures ;
- niveau 3: évaluation et avis de stratégies optimales de contre-mesures.

Le schéma ci-dessous montre d'une manière simplifiée l'acquisition et l'utilisation de données météorologiques pour les besoins du calcul de dispersion. Un préprocesseur météorologique calcule les champs de vent et de turbulence à partir de différents types de données météorologiques disponibles, aussi bien en temps réel qu'en prévision à l'aide de prévisions numériques météorologiques disponibles aux différents instituts météorologiques nationaux. Ces champs sont introduits dans les modèles de dispersion atmosphérique à échelle locale (dizaines de km) ou à grande échelle (centaines ou milliers de km).



Les résultats des calculs de dispersion sont ensuite introduits dans une chaîne complète de modèles de calcul tel que le démontre le schéma ci-dessous.



De cette manière il est possible de faire des calculs de doses détaillés pour toutes les voies d'exposition souhaitables, tout aussi bien en mode suivi qu'en mode prévision.

En utilisant les possibilités d'aide à la décision de niveau 2, les effets de contre-mesures possibles peuvent être démontrés.

RODOS constitue donc a priori un outil fort précieux pour faire bon nombre de calculs détaillés fort utiles durant un exercice d'évaluation ou même de décision radiologique. Malheureusement cela résulte en un système complexe nécessitant des compétences diverses dans le domaine de l'informatique (gestion de station de travail et du logiciel, des réseaux en ligne, etc ...) ainsi que des divers domaines de la radioprotection couverts par RODOS (dispersion, calculs de doses, agriculture, contre-mesures, etc ...).

Pour pouvoir effectivement utiliser RODOS durant une crise nucléaire un travail préparatoire considérable est nécessaire :

- élaboration de banques de données statiques: territoire, démographie, topographie, agriculture, mode de vie ;
- élaboration de banques de données dynamiques: données sur l'installation nucléaire, données météorologiques, réseaux météorologiques.

La migration de RODOS vers un outil opérationnel constitue donc un véritable projet et requiert la définition de besoins minimaux en termes d'infrastructure, de personnel et de procédures.

Finalement la question se pose du type d'utilisation de RODOS.

En situation d'urgence RODOS peut être utilisé à différents niveaux d'aide à la décision, cfr. supra, et être utilisé tout aussi bien en ligne que hors ligne.

Indépendamment de cela, RODOS constitue un outil fort utile pour des sessions de formations, à l'aide de scénarios accidentels divers, pour les différents aspects entrant en jeu durant une crise nucléaire.

Références

- [1] J.J. Van Binnebeek *Emergency plans in Belgium: the challenges of a high scale contamination*. Annales de l'Association belge de Radioprotection, Ce volume.
- [2] International Commission on Radiological Protection *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Publication 60, Pergamom Press, Oxford, New York, Seoul, Tokyo (1991).
- [3] International Commission on Radiological Protection *Principles for intervention for Protection of the Public in a Radiological Emergency*. Publication 63, Pergamom Press, Oxford, New York, Seoul, Tokyo (1993).
- [4] International Atomic Energy Agency *International Basic safety Standards for Protection Against Radiation and for the Safety of Radiation Source*. Safety Series 115, IAEA, Vienna (1996).
- [5] European Commission: RADIATION PROTECTION 87 *Radiological protection principles for urgent countermeasures to protect the public in the event of accidental releases of radioactive material*. Luxembourg, ISSN.1018-5593 (1997).
- [6] Arrêté royal du 27 septembre 1991 concernant le plan d'urgence pour risques nucléaires sur le territoire belge.
- [7] X. Liu, A. Sohier and C. Rojas-Palma *Parameter Uncertainty and Sensitivity Analysis for Gamma Dose Rate Calculations*. SCK•CEN Report BLG 720, Mol, RODOS(WG5)-TN(96)05 (1996).
- [8] C. Rojas-Palma and A. Sohier *OSSTERM: An Off-site Source Term Estimation Module for RODOS*. RODOS(WG5)-TN(98)-05 (1998).
- [9] A. Sohier and C. Rojas-Palma *Practical Considerations for Off-site Accident Management During the Early phase of a Nuclear Accident – An Overview* RODOS(WG5)-RP(98)-01, SCK•CEN, Mol (1998).
- [10] J. Ehrhardt *The RODOS Decision Support System for Off-site Emergency Management in Europe*. Proceedings of the Fourth International Workshop "Decision Making Support for Off-site Emergency Management", Aronsborg, Sweden, October 7-11, 1996, Radiat. Prot. Dosim. 73(1-4), 35-40 (1997).

Samenvatting

De Belgische wetgeving verplicht de uitbater van een nucleaire installatie ertoe om in geval van een nucleaire crisissituatie de verwachte dosisbelasting van de naburige bevolking en de omgevingsimpact te bepalen en die resultaten aan de bevoegde overheden door te sturen. In overleg met die overheden zijn een aantal relatief eenvoudige computercodes ontwikkeld voor verschillende Belgische nucleaire sites, vb. Noodplan Kempen en Noodplan Doel/Tihange, om hoofdzakelijk de gevolgen op korte termijn en op lokale en regionale schaal te bepalen, teneinde een geschikte snelle interventiestrategie te bepalen en te motiveren. Er wordt een overzicht gegeven van de verschillende modellen, van hun informatie- en gegevensbronnen en van hun basisfilosofie. De ervaring over het gebruik van die codes tijdens oefeningen wordt voorgesteld, gevolgd door een kwalitatieve

bespreking van de onzekerheid over het gebruik van dergelijke modellen en een discussie over de problematiek van de vergelijking tussen omgevingsmetingen en numerieke voorspellingen. Enkele aanbevelingen voor een meer geïntegreerd gebruik van die verschillende informatiebronnen worden geformuleerd.

Uiteindelijk worden de organisatorische behoeftes aangehaald voor het eventueel gebruik van performantere maar complexere codes, zoals RODOS, het nieuw Europees beslissingsondersteuningssysteem.

Abstract

According to the Belgian legislation the operator of a nuclear facility is required to perform the necessary calculations to assess the expected population doses and the impact to the environment in case of a nuclear incident, and to transfer those results to the competent authorities. Several rather simple codes have been developed in consultation with these authorities, e.g. Emergency Plan Campine and Emergency Plan Doel/Tihange, principally to assess the short term impact on the local and regional scale, allowing the authorities to define and motivate an urgent intervention strategy. An overview of the different models, their sources of information and their philosophy is given. The experience built during their use during exercises is presented, followed by a qualitative discussion on the uncertainty using such models and the difficulties related to the comparison of environmental measurements with numerical predictions. Some hints for a better integration of these different sources of information are given.

Finally, a brief discussion will be held about the organizational impact of the possible use of more powerful but more complex tools, such as RODOS, the new European software for decision aiding.

USE OF GIS IN RADIOECOLOGICAL RESEARCH IN THE CHERNOBYL EXCLUSION ZONE

**A. Arkhipov, A. Ischuk, V. Nagorsky, N. Arkhipov, N. Kuchma,
Yu. Ivanov, S. Paskevich**

Chernobyl Scientific & Technical Centre for International Research
Shkolnaja 6, Chernobyl, 255620 Ukraine

Abstract

A general description is given of Ukrainian part of the Chernobyl Exclusion Zone (ChEZ), after the Chernobyl Accident land contamination of the Former Soviet Union countries (FSU), its history and current state. The main structure of the GIS-Chernobyl database is reported. The most important direction of GIS using in the Chernobyl Exclusion Zone is the radiological assessment of the situation for administrative decision making. In order to show some practical results from using GIS some basic radiological principles which lead to GIS manipulation with the primary information layers is described. As practical result presented here is an example of contaminated territory reclassification on the base of radiological risk associated with different soils. The use of spatial analysis allowed us to develop a model of the floods of the Pripjat river, which is especially important in the spring period. A comparison of the spatial modelling with the real flood data obtained from space images is given. This work allowed avoiding extra expenses due to anti-flood measures during the 1999 spring. Some assessments of radionuclides stock in ecosystems of the ChEZ and decisions made on the base of GIS analyses are presented too. Basically GISs in the ChEZ are used for radiological assessment, analyses of crisis (emergency) situations, to make administrative response, and as a support system to produce a paper copy of different maps for infrastructure organisations.

Introduction

The Chernobyl accident is the worst and unprecedented disaster in terms of scale both in nuclear power production and in atomic industry. The explosion of Chernobyl reactor No. 4 in the night of April 26, 1986 and the subsequent fire, which lasted for about two weeks, caused a severe contamination of huge territories, mainly in the three Independent Republics of Belarus, Russia and Ukraine. As a consequence of this catastrophe, many population groups were

evacuated and hectares of agricultural lands were excluded from use. The economical and social impact was dramatic for the local populations but was also resented outside the borders of the former USSR.

Unit 4 was completely destroyed (Fig. 1) and approximately 11 EBq of radionuclides were released into environment. About 600 PBq of long-life radionuclides remained in the destroyed reactor. In addition, nearly 8 PBq of high, medium, and low-level radioactive waste was buried in 800 temporary disposal sites. About 30,000 km² of territory in Belarus, Ukraine and Russia have a radioactive contamination density exceeding 185 kBq m⁻² [1]. Not only FSU countries were affected by Chernobyl disaster; really large areas of Europe countries were contaminated by long-life radionuclides too (Fig. 2). This fact determines the importance of assessing the practical regularities that prevailed in the highly contaminated territories like the territory of Chernobyl Exclusion Zone or the closed territories.

There are different evaluations of the surface contamination in the most affected areas of the FSU. Here are shown data that were prepared by the special expert commission for the report of Supreme Soviet of USSR to IAEA. They correspond to an assessment for 1989 .

Table 1: Total areas in Belarus, Russia, Ukraine, contaminated after the Chernobyl Accident (in 10³ km²) [9]

Country	5-15 Ci/km ²	15-40 Ci/km ²	>40 Ci/km ²	Total
Belarus	7200	4060	2210	13470
Russia	4540	2320	360	7250
Ukraine	2350	740	680	3770
FSU	14100	7150	3250	24500

The ⁹⁰Sr contamination lies mainly within about 70 km of the Chernobyl site, although some significant contamination (37-74 kBq m⁻²) can be found in an area extending to about 50 km Northeast of the town of Gomel in Belarus. [5,6]

As described in table 1, the largest contaminated areas belong to Belarus, but the most heavily contaminated plots are located in Ukraine, close to thr CheNPP.

In general the distribution of population throughout the contaminated areas is proportional to the area of the contaminated zones in the three countries, but the population of Ukraine which lives in the highly contaminated zones is larger than in Russia and Belarus.

Table 2: Population of Belarus, Russia, Ukraine living on contaminated territories (thousand of persons) [9]

Surface Contam. Ci km ⁻²	<5	5-15	15-40	>40	
Country	persons				total
Belarus	1734	267	95	9	2105
Russia	109	73	108	5	295
Ukraine	1227	204	304	19	1480
FSU (total)	3070	544	234	33	3883

The modern assessment of surface contamination obtained by carrying out the ECP-projects are given in table 3.

Table 3: Areas of ¹³⁷Cs Contaminated Land (km²) in Ukraine, Belarus and Russia at Levels between 37 and 1480 kBq/m² (1-40 Ci/km²) [5, 6].

Country	37-185	186-555	556-1480	Totals
Ukraine	34000	1990	820	36810
Belarus	29920	10170	4210	44300
Russia	39280	5450	2130	46860
Total	103200	17610	7160	127970

Description of Ukrainian part of the ChEZ location, legislation

The presented data concern the Ukrainian part of the so-called Chernobyl Exclusion Zone. According to the Ukrainian legislation [2] the contaminated territories of Ukraine are reclassified into four different zones (table 4).

The data from the observation territory presented in this report correspond with the first and second zones. Currently both zones are combined under the administrative responsibility of the Administration of the Exclusion Zone. The specific characteristic of the administrative work in the ChEZ is as follows: before the accident the combined territories known as the 'Exclusion Zone' belonged to different administrative regions of Ukraine, but after the accident the ChEZ became a separate territorial unit, where all former and modern services are subordinated to a 'Central Administration' of the Zone. Because of this the activity of the present unit to manage the Zone covers a large complex of different tasks (which are under the responsibility of various departments), usually: starting with radiological monitoring and research and encompassing administrative-municipal services, preservation of regime and others. Taking into account, that the objects under control are located in a large territory, GIS is one of the key methods which are used to govern the territory.

Table 4: Reclassification of Ukraine territory according to the radiological limit

1. Exclusion zone	The areas from which the population was evacuated in 1986
2. Zone of unconditional (obligatory) resettlement	$Cs > 555 \text{ kBq/m}^2$ or $Sr > 111 \text{ kBq/m}^2$ or $Pu > 3.7 \text{ kBq/m}^2$, where $Def_{eff} > 5 \text{ mSv/yr}$.
3. Zone of guaranteed voluntary resettlement	$185 < Cs < 555 \text{ kBq/m}^2$ $5.5 < Sr < 111 \text{ kBq/m}^2$ $0.37 < Pu < 3.7 \text{ kBq/m}^2$, where $Def_{eff} > 1 \text{ mSv/yr}$.
4. Zone of enhanced radioecological monitoring	$37 < Cs < 185 \text{ kBq/m}^2$ $0.74 < Sr < 5.5 \text{ kBq/m}^2$ $0.185 < Pu < 0.037 \text{ kBq/m}^2$, where $Def_{eff} > 0.5 \text{ mSv/yr}$.

Description of GIS in the Chernobyl Exclusion Zone

Basic principles of the system

In principle there are no formal systems of decision making in the ChEZ. Rather it is a logical or virtual structure distributed among several scientific and technical organisations, combined by the Administration of the Exclusion Zone.

This system includes the following levels:

- The first level directed to the storage of the primary information and initial analysis that includes creation and filling of databases, integration of results in the GIS, evaluation of the processes of radionuclides migration through the ecosystems, radiobiological and total environmental consequence of ecosystems, study of systems of land use;
- The next level is based on the analysis of the appropriateness and ways of contaminated land use. That considers some scenarios - zone as reservoir, agricultural use of lands, forestry, use of territory as a site for scientific researches and tests of the specialised engineering, use of special plants for phytoremediation of territory (by reducing the amount of radioactive substances in soil). Naturally the indicated scenarios are not exclusive but complementary;
- Then the level of the economical assessment follows. This level first of all is based on the comparison of costs of the scenarios including protective counter-measures and the scenarios implementing usual technologies;
- The last level is the real GIS - analysis, support to the evaluation of risks, which is the base for acceptance of the administrative decisions.

Such a virtual system allows, on the base of a the GIS solution, to determine the direction and principles of territory development and to make decisions in crisis situations.

Review of GIS Data Bank

A strategy of support of the databank for digital maps and airspace images has been defined for the ChEZ. This bank contains systematised data, which were created in the Zone and were received from different organisations with copyright protection. Today our bank contains dozens of different maps of Ukraine, FSU, Europe, and especially of the ChEZ. There is a small set of satellite images (SPOT, ERS, IRS, and RADARSAT) in the bank too.

The availability of a uniform databank leaves the decision on the question of the requests to it of thematic materials and delivery to their ultimate user. For this purpose the description of the contents of the federal databank or metabase, is used. With the help of the metabase each user can search his specific topics in the bank. To deliver rather small volumes of data, the Internet network is used as practically all enterprises in the ChEZ are connected. The transfer of large volumes of data is decided by traditional methods — use of external carriers of large capacity.

The maps contain the information on the condition of radioactive pollution of land, types of soil, its properties, forestry condition, ground and surface waters; landscapes, administrative division, arrangement of forces and means of police, anti-fire stations and civil defence. All cartographic materials are executed in standard systems coordinates, on topographical bases of various scales (1:10000, 1:25000, and 1:200000) and are provided in Arc/Info, Arc/View and MapInfo formats.

Based on the digital bank the process of GIS introduction to the system of decision making is leading into the following directions:

1. To support a bank of digital maps and airspace images for joint utilisation;
2. To refresh by remote control methods the base digital layers;
3. To organise a system of quick preparation and copying of thematically and special maps according to the administrative requests;
4. To install modelling GIS systems and analyses of spatial distribution of radionuclides and emergency situations on the territory of the ChEZ;
5. To provide methodological support to other organisations which use GIS.

Overall characteristics of the radioecological situation in the Chernobyl Exclusion Zone (Ukrainian part)

The area of the ChEZ territory now is about 2500 km². At present close to 50% of the territory is forest covered and approximately 30% is grassland, basically self-created on former agricultural land. Other parts of the territory are roads, settlements, lakes, rivers, the cooling pond and other technical objects. The modern state of situation in the ChEZ is presented in Fig.3.

Radiological description

The surface contamination of the ChEZ territory varies in a wide range - from 0.1-0.5 Ci/km² up to thousands Ci for ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr. In Figures 4 and 5 the maps of the Zone territory contamination by ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs radionuclides are presented.

They give radiation situation in the Zone as a whole.

Till now the radioactive contamination of territory is one of the main potential factors to create danger from the ChEZ objects for the population living close to the Zone and the population of Ukraine as a whole. The evaluation of radionuclide inventory distribution among the various objects of the Zone according to the analysed data [4,8] is presented in Table 5.

Table 5: Stock of radionuclides in the objects and components of the ChEZ

Object	Activity, Ci			
	Total	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	TUE
Territory of EZ	2.1·10 ⁵	1.44·10 ⁵	6.4·10 ⁴	2.6·10 ³
including:				
Forests	1.23·10 ⁵	8.4·10 ⁴	3.7·10 ⁴	1.5·10 ³
Former agricultural lands	8.8·10 ⁴	6.0·10 ⁴	2.7·10 ⁴	1.1·10 ³
PRAWD and PTLRAW	2.23·10 ⁵	1.4·10 ⁵	8.0·10 ⁴	3.0·10 ³
Pond-cooler	~ 5.0·10 ³	3.5·10 ³	1.5·10 ³	86
Reservoirs of EZ	~ 1.1·10 ³	5.5·10 ²	5.0·10 ²	14
SHELTER Object	~ 2.0·10 ⁷	1.3·10 ⁷	7.0·10 ⁶	2.7·10 ⁵

The largest part of radionuclides is concentrated in the Shelter (Sarcophagus) object. According to maximal estimations there are about 180 tons of nuclear fuel inside, that contains radioactive substances with about 20 millions Ci of total activity. Besides fuel, a host of radioactive materials, which consist of the residues of the destroyed unit active zone, reactor graphite, contaminated metal and building constructions of the power-unit are concentrated in the Shelter object.

A significant part of radioactive substances (about 0.22 million Ci) released from the power unit is located in Points of Radioactive Waste Disposal (PRAWD) and Points of Temporary Localisation of Radioactive Waste (PTLRAW). Approximately the same amount of radionuclides (0.21 millions Ci) is in various natural objects of the Zone. The greatest radionuclide reserves are in the forests which at the moment of accident became the concentrators of radioactive dust and aerosols. The territory with a density of radiocaesium contamination of over 15 Ci km⁻², radiostrontium contamination over 3 Ci km⁻² and plutonium contamination over 0,1 Ci km⁻² is about 1800 km² [12].

Non-radiation factors of the ChEZ

The specific ecological situation that has been formed in the Zone, both as the result of the radioactive contamination of territory and the termination of the full-value care of forest and former agricultural coenoses demands a careful study and estimation of the importance of a number of non-radiation factors, first of all, being the forest territories. Nowadays forests occupy almost half of the territory and former agricultural lands occupy one third of the whole area of the Zone.

The unfavourable natural and anthropogenous factors result in deterioration of the common ecological situation. So, for example, the most dangerous negative factor for forests is forest fire (Fig. 6). Because of the absence of a fully-fledged care system for forests, the negative influence of the vermin and illnesses on the general state of forests grows.

Any disturbance of the natural coenoses' integrity results in significant changes of the intensity and orientation of the migration processes. This can be observed on pine plantings, which have been exposed to radiation and forest fires. The abrupt termination of man's interventions on ecosystems (both agricultural and forest) stimulated natural processes, which not always had a favourable character. During the first years after the accident a significant growth of rodent population was noted. In the Exclusion Zone centres of illness and vermin are constantly registered. They occur twice as frequently as on cultural crops outside the Zone.

The analysis of data on prevalence of diseases on cultural plants and weeds shows that on the latter, the number of parasites was twice as much as on agricultural cultures. In total about 40 activators of different kinds of diseases are observed. The study of racial and genetic structure of the mildew activator showed, that during the first years after the accident the form-creation processes had amplified considerably. In this period 5 forms, not registered in the European register were identified, and three of them were highly virulent and potentially dangerous [12].

Practical Applications of GIS in Chernobyl Exclusion Zone. Practice

Basic radiological principles (terminology) needed to create and use data layers

In our work we use the following basic radiological principles, notions, and units:

- Level of surface contamination (density of contamination), - reflects total stock of radionuclides in the surface layer of soil, normalised to the area

unit, expressed in units of Ci/km² or kBq/m². 1 Ci/km² is equal 37 kBq/m²

- Transfer factor, (Tf) unlike the accumulation factor, it shows the concentration of radionuclides per unit weight of plant due to the transfer of radionuclides from a unit of surface. It is expressed as (nCi/kg)/(Ci/km²) or (Bq/kg)/(kBq/m²). Old and new units have the same dimensions.
- Flux, or stock of radionuclides in plant biomass, practically is the development of Tf taking into account the yield of plant (stock of biomass). Thus, flux is obtained multiplying Tf with the biomass and has a kBq/m² unit. It can be recalculated as per cents.
- Physical-chemical forms of radionuclides. Is related to the form of fallout (fuel or condensation form). It shows the amount of moveable (fixed) form of a radionuclide in soils, and is a measure of the relative mobility of radionuclides in soil and in the soil-plant chains. Usually the form is described as a fraction or percent of each radionuclide present in soil.

Map of fractionating factor

Inside the limits of the ChEZ, the fuel particles can represent up to 80 % of the common contamination of the zone, especially in its nearby part (5 km). In the South and Southwest directions from the reactor more than 50 % of radiocaesium remains in the structure of the fuel particles. The fuel particles on the bottom of the Kiev reservoir were transported not only by air but also by the water flow of the river systems. «Hot» particles were detected in the bottom sediments of the Kiev reservoir to a depth of up to 15 cm.

In the nearby, 5-km, zone around the CheNPP the «hot» particles have sizes ranging from several microns to 200 microns. Outside the 5-km zone the size of particles decreases. The generalisation of data accumulated for first two years after accident, has allowed us to make a map of fuel-particles distribution in the ChEZ (Fig. 7) using the fractionating factor (ratio ¹³⁷Cs to ¹⁴⁴Ce in fuel-particles to ratio ¹³⁷Cs to ¹⁴⁴Ce in soil) as index.

The amplification of colour corresponds to the magnification of the fuel component of fallout (woods are shaded with an oblique line). As the fuel component in effect represents the micro-particles of irradiated fuel expelled as a result of the accident, the sites on the map with an amplification of colour correspond to those sites of the exclusion zone where the radionuclides mainly incorporated in the matrix of the fuel particles are involved in soil-chemical processes. At present there is not enough of systematised data about the intensity and degree of completion of the

process of fuel particle radionuclides transformation in soils. Therefore, it is impossible to speak with confidence about the degree of modification and stabilisation of the ecological conditions in those sites of the zone where the fuel component of fallout is represented.

The role of this map is that it shows the pattern of the initial fallout on the ChEZ territory, its physico-chemical forms (fuel, condensation) and the relation of these forms in specific regions of the zone. It can be used when deciding about the mode of soil recovery and the implementation of the system of countermeasures in specific regions of the zone.

Diffusion model of hot particles

Solid-state diffusion of radionuclides or their selective leaching from fuel particles can have an impact on their transfer (in particular strontium) to the mobile forms. On the basis both of data on dynamics of the physico-chemical forms of the radionuclides with time and of the theoretical representation about the release of radionuclides from the «hot» particles by the mechanism of solid-state diffusion, the kinetic model of the modification of the ^{90}Sr and ^{137}Cs forms in soil [11] have been developed. According to this model the formation of the mobile forms of radionuclides of fuel fallout happens owing to solid-state diffusion, dissolution of fuel particles and leaching of radionuclides from particles owing to the interaction with soil solution. All indicated processes are irreversible as the destruction of particles of uranium dioxide, U(IV) representing the matrix of fuel particles is inevitable owing to its instability in soil where the stable valence form is U(VI) which has good solubility in the natural waters of the Polesie.

In soil the following mechanisms of transformation of radioactive fallout are possible:

1. Single-stage transformation of radioactive fallout at which the mobile forms, as a result of irreversible reactions of destruction of fuel fallout, will be obtained only. With the single-stage transformation, accumulation of the mobile forms which are observed for ^{90}Sr in soddy-podzolic soils is to be expected.
2. Two-stage transformation which is characteristic of radiocaesium which is expressed in the sequential reactions of formation of the mobile and fixed forms.

The calculated kinetic curve accumulation of the mobile and fixed forms of radiocaesium are represented in Figure 8. A decrease of the amount of radiocaesium in the structure of fuel particles (curve 1) is observed that is accompanied by subsequent fixing (irreversible sorption) by the solid phase of soil (curve 2). Two opposite-directed processes govern the content of the mobile forms (curve 3): the release of radiocaesium from the structure of fuel particles and its fixing in the solid

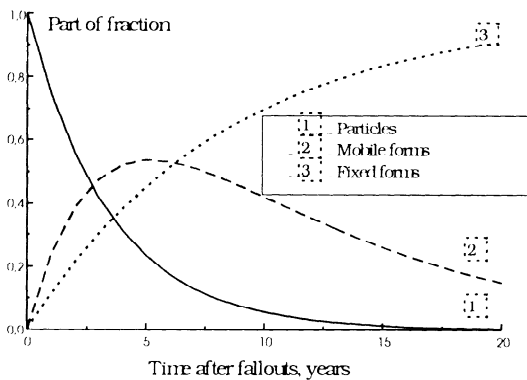


Figure 8: Accumulation of the mobile and fixed forms of ^{137}Cs in soils of the CheNPP exclusion zone [11]

phase of soil. The maximum content of the mobile forms was observed 3 to 4 years after the accident (The process of release of radiocaesium from the structure of fuel particles prevailed above the process of fixing by solid phase of soil). It was responsible for the magnification of the transfer of radionuclides to plants. The dynamics of the transformation of the physico-chemical form of radionuclides in soil was taken into account using simulating of the migration processes and the creation of maps. As a result of form transformation of radionuclides in soil the same time-dependant behaviour of radionuclides was observed in different plants, animals, and other parts of the food chains.

Transfer of radionuclides of caesium and strontium from soil into plants

The observations on the behaviour of the most significant radionuclides ^{137}Cs and ^{90}Sr in the soil-vegetation cover and the intensity of their transfer into plants show the basic role of the physicochemical form in soil. The approximating lines, which describe the long-term dynamics of Tf in plants, practically follow the lines of the mobile forms contained in soil. It is very important to note that the same dynamics of Tf is observed for different kind of plants, animals, fish and other biotic compartments of the ecosystems. The generalised data on the modification of the

Tf of radionuclides in a mixture of meadow grasses obtained over a period of 10 years are displayed in Figure 9, showing the dynamics of the mobile form. The analysis of the data obtained over 13-years allows one to speak about the existence of a general tendency to an enhancement of the ^{90}Sr transfer into meadow vegetation with time and of a stabilisation of ^{137}Cs accumulation by meadow vegetation that is connected to the common dynamics of physico-chemical condition of these radionuclides in soil and corresponds to outcomes mentioned above for the process of vertical migration.

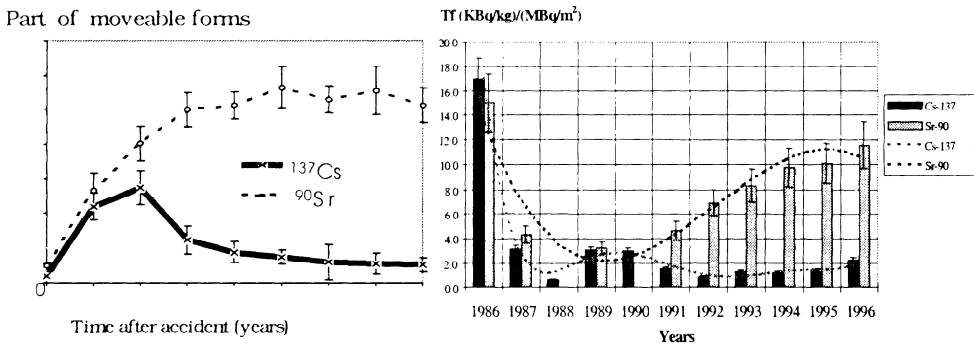


Figure 9: Long-term dynamics of ^{90}Sr and ^{137}Cs transfer factor into meadow vegetation on soddy-podzolic soils of the central part of the 30-km zone (kBq/kg)/(MBq/m²) (Compare with forms dynamics)

Intake of radiocaesium and radiostrontium by the human organism with the food intake (on the example of self-settled population in the ChEZ)

The input data for the definition of the radioecological situation in the regions and further evaluation of possible irradiation doses of the population are the levels of contamination of soils, drinking water, transfer factors of radionuclides from soil into agricultural production and other natural food and the actual food intake best approximation. The levels of soil contamination and drinking water are specific to each region, the information on transfer factors and food intake (standard in Ukraine) are presented in table 6 and 7:

Table 6: Average value of transfer factors of ^{137}Cs and ^{90}Sr to foodstuff, (Bq/kg)/(kBq/m²).

Tf	^{137}Cs	^{90}Sr
Soil - milk	0.2	0.15
Soil - potatoes	0.25	0.34
Soil - meat	2.0	0.01
Soil - vegetables	0.25	0.30
Soil - fruit	0.10	0.20
Soil - bread	0.5	1.2

Table 7: Food consumption

Product	Consumption, kg/day
Bread	0.386
Water	2.2
Milk	1.022
Meat	0.186
Potatoes	0.359
Vegetables	0.279
Fruit	0.129
Fish	0.048
Eggs	0.745

Using these data the evaluation of the contribution of various products to the intake of ^{137}Cs and ^{90}Sr with the food allowance by the human organism (Figure 10) was carried out.

It can be seen from figure 10 that milk and dairy products are the main contributors to the intake of ^{137}Cs with the food allowance. Bread and potatoes are the main contributors for ^{90}Sr .

The problem of radionuclide flux with agricultural produce is also of great importance. The magnitude of this flux can be evaluated on the base of data on the concentration of radionuclides in produce and the productivity (Table 8).

Table 8: Relative flux of ^{137}Cs and ^{90}Sr in the agro-ecosystem of the Chernobyl Exclusion Zone normalised to 1 KBq/m^2 of soil contamination density

	Average TF		Productivity kg/m^2 (d.w.)	Flux Bq/m^2	
	^{137}Cs	^{90}Sr		^{137}Cs	^{90}Sr
Winter wheat	1.24±0.3	3.26±1.1	0.17	0.21	0.55
	1.85±0.4	3.78±1.1	0.08	0.15	0.30
Winter rye					
Barley	0.37±0.1	0.94±0.3	0.14	0.05	0.13
Oats	0.32±0.2	0.63±0.14	0.08	0.03	0.05
Maize	0.16±0.1	2.5±0.7	0.3	0.05	0.75
Rape	11±4	34±22	0.12	1.32	4.1
Lupine	6.4±2.3	4.27±2.12	0.11	0.71	0.46
Potato	0.25±0.08	0.34±0.12	0.7	0.15	0.24
Meadow grass	3.7±1.9	10.6±1.5	0.1	0.37	1.06
Milk produce	0.1±0.04	0.15±0.06	0.08	0.008	0.0125
Meat produce	1.0±0.4	0.01±0.003	0.7	0.7	0.007

The outcomes shown in table 8 allow us to conclude that:

- the contribution of individual products to the flux of radionuclides, structures of areas under each crop being equivalent, is larger when transfer factors and productivity are larger;
- by changing part of the crop in the structure of land tenure it is possible to control the radionuclides flux.

Approach to an evaluation of possible territory rehabilitation (based on the example of the ^{137}Cs contamination)

A primary consideration of development of the rehabilitation strategy is the evaluation of the possible collective exposure dose to the population, which is created by the external irradiation and the internal exposure (basically through the food chains). To assess the radionuclide transfers to food it is necessary to collect factual information and perform a division into districts according to the degree of the radionuclide biological availability and considering the soil properties and landscape peculiarities. That implies:

- Soil-landscape division of the Chernobyl Exclusion Zone territory, grouping of soils and landscapes with regard to the ecological criteria as well as the radiological ones;

- Analytical generalisation of data on transfer factors of radionuclides into meadow plants and as a result subdividing the soils for distinct landscapes into groups distinguished by their degree of radionuclides biological availability;
- Compiling of summary databases and working out the technology of superposition of heterogeneous data sets;
- Geographical binding of information obtained at previous stages with the help of geo-information systems;
- Construction of work maps in a small scale (1:200000) for the comprehension of the strategy of rehabilitation;
- Collection of detailed information on the most critical districts in the radiological sense;
- Construction of detailed work maps for elaborating the specific measures.

Already we have summarised the long-term data on ^{137}Cs transfer ratio into grass cover on different type of meadows obtained as a result of our own researches, researches in the frame of collaborative international projects, other collaborative projects and literature data [ECP-2, ECP-5, 1996]. An analysis of the data demonstrated that for the first level of grouping the use of such base soil-landscape indexes as granulometric composition and moisture degree is enough to make first approaches to the classification of land patches (Table 9):

Table 9: Grouping of Chernobyl NPP exclusion zone soils by degree of ^{137}Cs biological availability

	Granulometric composition	Type of moistening	Average Tf, Bq/kg/KBq/m²
1	sandy	dry	4.6
2	loamy sand	dry	4.2
3	light loamy, middle loamy	dry	2.9
4	heavy loamy	dry	0.5
5	sandy	low-lands	5.4
6	loamy sand	low-lands	5.4
7	light loamy, middle loamy	low-lands	4.6
8	peat	low-lands	8.9
9	sandy	flood-lands	7.1
10	loamy sand	flood-lands	6.7
11	light loamy, middle loamy	flood-lands	6.3
12	peat	marsh	29.2
13	sandy	marsh	15.0
14	loamy sand	marsh	12.0

To make the spatial analysis, we have created a digital map of soil-landscape cover of the ChEZ with a database of basic agrochemical indexes. As a result of design work on territory of the exclusion zone the morphological description of soil profiles, information on the granulometric composition of soil, on the degree of proximity of ground waters to the surface and on the degree of humification of soil were obtained. That has allowed us to conduct a quantitative evaluation of the biological danger of the radioactive fallout for which calculation of the space distribution of radionuclides, the properties of soils and landscape peculiarities are taken into account.

For the decision making concerning the resettlement of the population from the radioactive contaminated territories and the exclusion of these territories from agricultural use in the former USSR the following criteria of radioecological zoning of territories (recommended in 1986) were used: territory contaminated by less than 15 Ci/km² of ¹³⁷Cs, agricultural using authorised without limit; from 15 Ci/km² up to 40 Ci/km² limited agricultural using was recommended; more than 40 Ci/km² agricultural using was prohibited.

But the actual radioecological situation is such that, for example, the level of contamination of milk obtained on pastures with peat soils with a level of ¹³⁷Cs contamination up to 15 Ci/km² often exceeds the level of contamination of milk obtained on sandy soils with a level of ¹³⁷Cs contamination of more than 40 Ci/km². Therefore we carried out an evaluation of the biological danger of the radioactive fallout with allowance for soil-landscape peculiarities. For this in the MapInfo 5.0 system of handling of geographical information, an overlapping of data on the soil-landscape cover of the exclusion zone territory and the data represented in table 9 was performed. The subsequent use in the Surfer 6.0 system of mathematical simulation of geographical information has allowed obtaining the normalised radioecological characteristic of the exclusion zone territory (Figure 11). This map represents the risk of soil, or meadow vegetation contamination by ¹³⁷Cs for a uniform contamination of the territory. The amplification of colour intensity on the map corresponds to the magnification of the transfer factor.

The map presented in figure 11 is constructed assuming that the whole exclusion zone is represented by meadow biocoenoses. Actually its significant part is occupied by forest biocoenoses (hatched areas) for which other values of the transfer factors, different from those used for meadow biocoenoses prevail and for which the principles of territory grouping on soil-landscape indexes are peculiar. Therefore the following stage is the construction of a normalised characteristic of

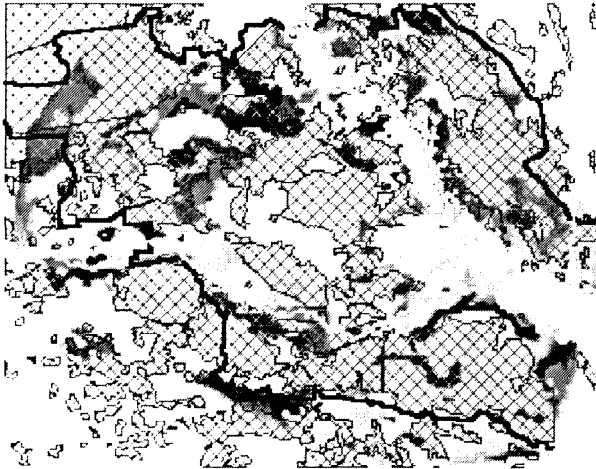


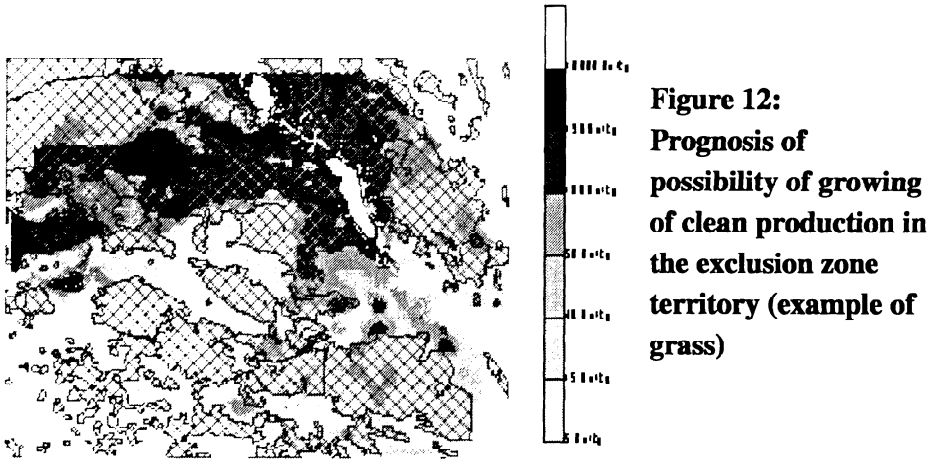
Figure 11:
Normalised
radioecological
characteristic of
exclusion zone
territory

the exclusion zone territory which takes into account the peculiarities of radionuclide transfer into forest and meadow plants. An application of maps of such type (extended on any territory polluted after a accident at a nuclear or chemical plant) can be the analysis of the territories with the purpose of determining the primary use for forestry or agriculture, or to decide the complete withdrawal from economic use.

On the basis of data on the ^{137}Cs space distribution (Figure 5) and normalised radioecological characteristic of the territory (Figure 11) it is possible to make a prediction evaluation of possibility of obtaining pure milk on the zone territory (Figure 12). On figure 12 the value 100 Bq/kg corresponds to the accepted specifications in Ukraine for allowable level of ^{137}Cs contamination of milk.

The map of territory reclassification (Figure 12) as a whole considerably differs from the map constructed on soil contamination which only testifies to the necessity of the substantiation and development of new criteria of rehabilitation and use of territories in a national economy.

Thus a methodology of combining various radioecological and geographical information data sets is developed, which allows analysing possible schemes of economic use of the territories which have undergone the man-caused contamination.



GIS analysis of flood consequences for the Chernobyl Exclusion Zone

A really serious problem of the ChEZ is that of spring flood. This is especially important because the river Pripjat flows through the highly contaminated parts of the zone and provides for outgoing flux of radionuclides. During 1990-1996 the average annual radionuclides outflow with the river Pripjat waters into the Kiev reservoir was 90-400 Ci of ^{90}Sr and 30-120 Ci of ^{137}Cs . During the ten years from 1986 to 1996, 3,060 Ci of ^{137}Cs and 3n500 Ci of ^{90}Sr left the Zone carried by water. [1, 8, 12]

In 1997 by the main waterway of the Zone, river Pripjat, about 40 Ci of ^{137}Cs and about 70 Ci of ^{90}Sr flew out. Nowadays, the contamination of water occurs basically on the account of radionuclides washout of the contaminated territories.

The pond-cooler of the CheNPP is the reservoir of 22.9 km² area; the stock of water in it is 160 million m³. In 1989-1993, the average annual value of the ^{137}Cs specific activity in the pond-cooler waters fluctuated within the range of (1.4 to 3.3) 10^{-10} Ci l⁻¹. For ^{90}Sr the specific activity ranged between 1.2 and 2.3 10^{-10} Ci l⁻¹. The total activity of ^{137}Cs in the bottom sediments reached 3,500 Ci, 800 Ci of ^{90}Sr and up to 3 Ci of $^{238,239}\text{Pu}$. The contribution of the pond-cooler to the total radionuclide outflux is approximately 6 %.

The intensity of radionuclide transfer by the waterway out of the Zone boundaries can markedly increase in case of high waters (Fig. 12.).

So, in the case of high water occurrences having a 25 % frequency it can be expected that on account of the washout of the flood-lands (the worst scenario), an activity

outflow beyond the Zone limits of up to 500 Ci per year may occur. That is why modelling of the spring flood is so important.

As first stage the most effective result of GIS simulation application had become the forecast of the areas of freshet flooding of flood-lands of the Pripjat river which was expected in spring 1999. On the basis of the toolkit of the block GRID Arc/Info and Spatial Analyst Arc/View the opportunities of spatial analysis in comparison of the three-dimensional model of the relief and model freshet slope of the river were realised. The verification of the model was conducted on recent data of the flooding contours obtained by remote control on the basis of satellite images SPOT 1990, 1994, 1997 and 1999.

On the basis of the verified forecasts preventive measures against flood have been applied. The adequacy of the forecast for the 1999 spring have been evaluated after reception and processing of the ERS snapshot made by order of the Zone Administration during the maximum rising of water on April 5, 1999. This confirmed the accuracy of the measures and showed the economical role of GIS.

As a result of forecasting the degree of flood, the danger of severely polluted plots of flood-lands, radioactive waste burial places, occupied items, roads etc., important objects and the effectiveness of existing water barrier structures with allowance for their present condition were evaluated.

Conclusion

At present the GIS of the Chernobyl exclusion zone with respect to its capabilities as decision making system to solve some radiological, ecological or administrative problems is in development yet. However it is necessary to continue improving this system, especially in collaboration with other leading institutes of Europe.

Acknowledgement

The authors are really thankful to the ABR-BVS, for the invitation to deliver this contribution, to the workers of the Chernobyl Scientific and Technical Centre who made the research and obtained the data for the GIS analyses and especially to Etienne Van der Stricht, who helped us in preparing this article and made the arrangements for our participation to the meeting.

Reference

1. "Comprehensive risk assessment in consequences of the accident at CheNPP" Editorial Board: V.G. Barjakhtar, V.P. Kukhar', I.P. Los' et al. Ukrainian STC, Ukrainian (Project 1 369). Kiev, 1998
2. «On a legal mode of territory, which has undergone to the radioactive contamination due to the Chernobyl accident» // Bulletin of Ukraine's Supreme Soviet 137 15.09.1992
3. Arkhipov A.N., 1994, Arkhipov N.P., Gorodecky D.V. Development of radioecological situation on agricultural lands of CheNPP exclusion zone // Pre-print, Chernobyl.
4. Chernobyl catastrophe / Chief - Editor V.G. Barjakhtar // Kiev, Naukova Dumka, 1996.
5. ECP-2: The transfer of radionuclides through the terrestrial environment to agricultural products, including the evaluation of agrochemical practices, (Ed. G. Rauret and S. Firsakova), Final report, 1996
6. ECP-5: Behaviour of radionuclides in natural and semi-natural environments" (Ed. G. Show and B. Rafferty), Final report, 1996
7. L.I. Frantsevich, A.D. Komissar, A.A. Yermakov, et al. Assessment of the radionuclides carrying out by the animals - migrators. Reports of the First All-Union Scientific and Technical Meeting on the Results of the Liquidation of the Consequences of Chernobyl NPP Catastrophe / Editor.Ye.I. Ignatenko. Vol.3, part.II/ - p.p.110-123/
8. National Report of the Ukraine «10 years after the accident at Chernobyl NPP » Minchornobyl, Kiev. 1996. – P. 250.
9. Report of Expert Commission to Supreme Soviet of USSR, 1991
- 10.Sandalls F.I., Segal M.G., Victorova N. Hot Particles from Chernobyl: A Review // J. Environ. Radioactivity. – 1993. – N 18. – P. 5-22/.
- 11.Sobotovich E.V., 1994, Dolin V.V., Mechanism of accumulation of migration forms of ^{137}Cs and ^{90}Sr in the soils of the near-zone of Chernobyl NES, Problems of Chernobyl Exclusion Zone, 1, Kiev, P.55-60
- 12.V.I. Kholosha, N.I. Proskura, Yu.A. Ivanov, S.V. Kazakov, A.N. Arkhipov, «Radiation danger of Exclusion Zone objects» // Bulletin of Chernobyl Exclusion Zone 1999, No.13 P.4-9



Figure 1:

Fourth Unit of the Chernobyl Nuclear Power Plant after the explosion

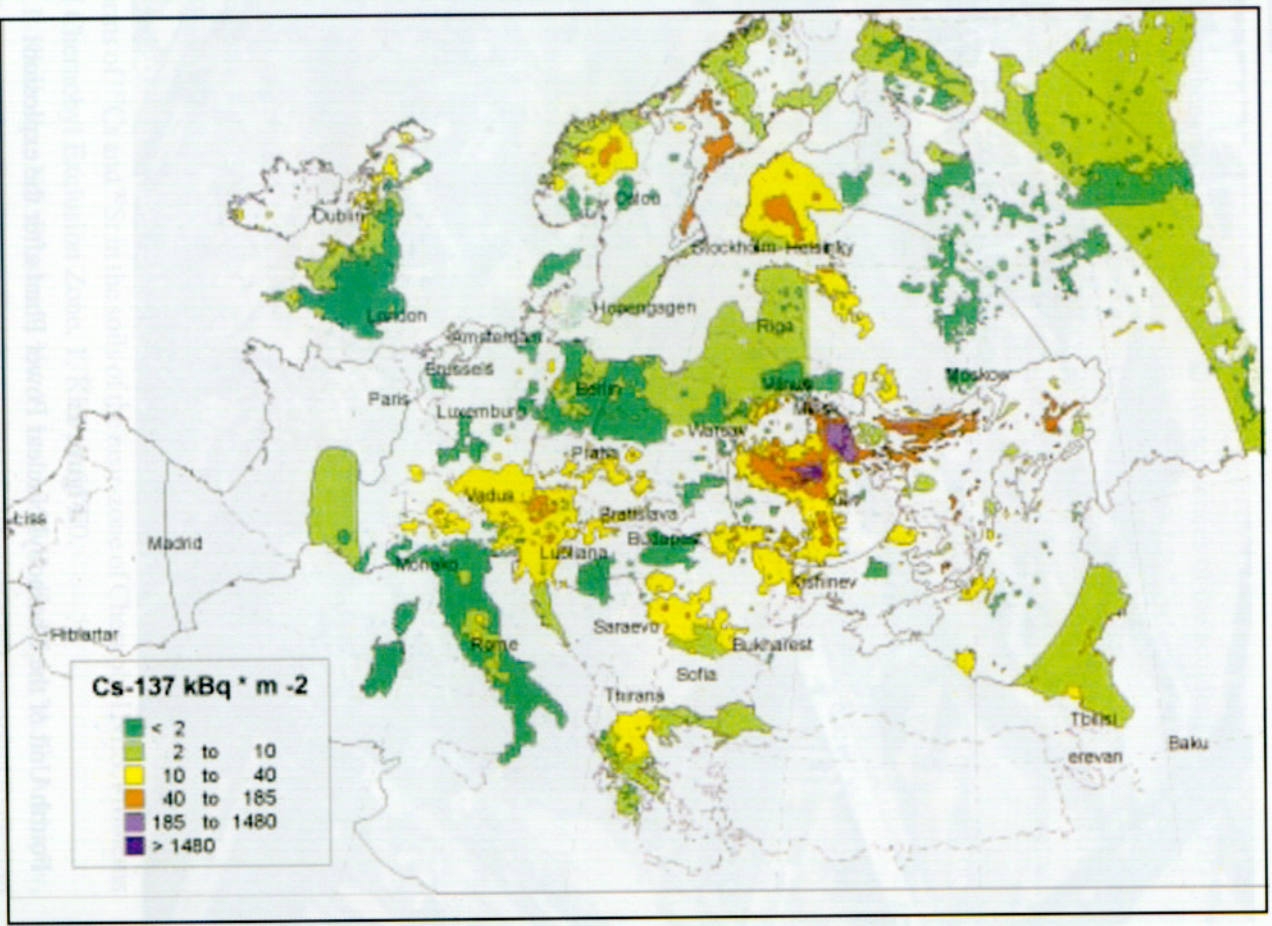
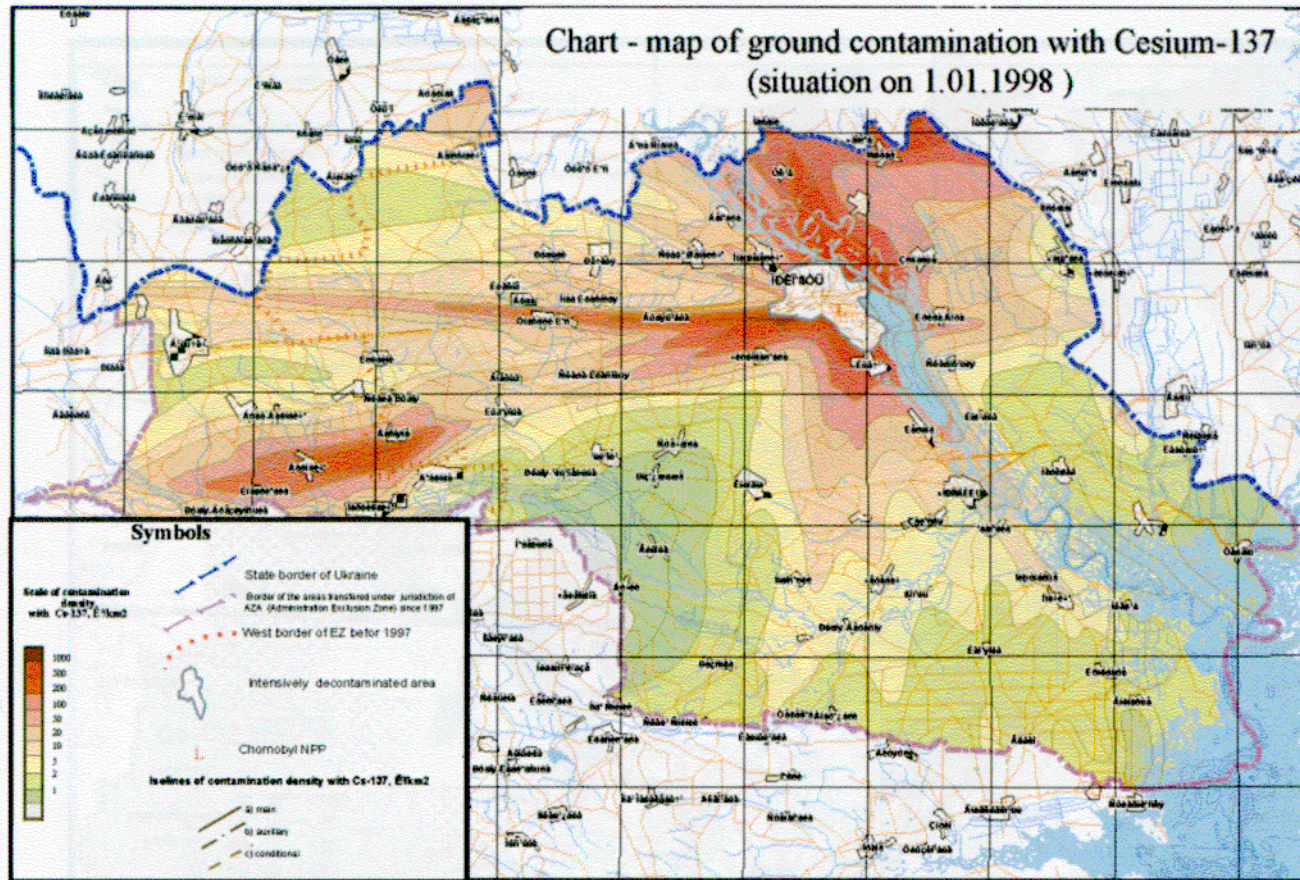


Figure 2: The map of ^{137}Cs density over Europe [1]

Figure 4: Map of ⁹⁰Sr contamination of the ChEZ



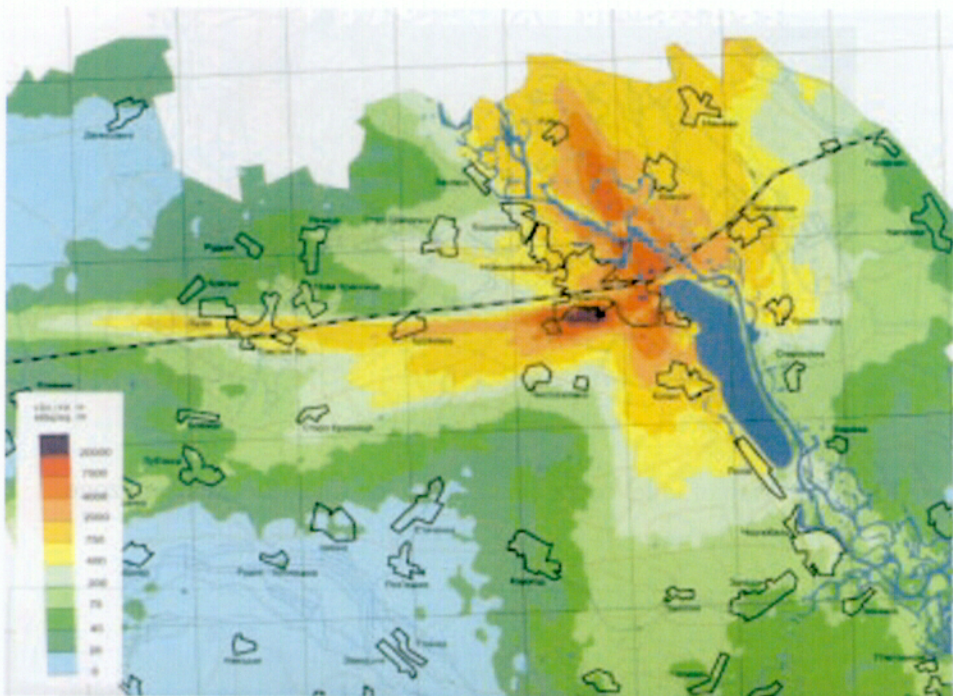


Figure 5: Map of ^{137}Cs contamination of the ChEZ

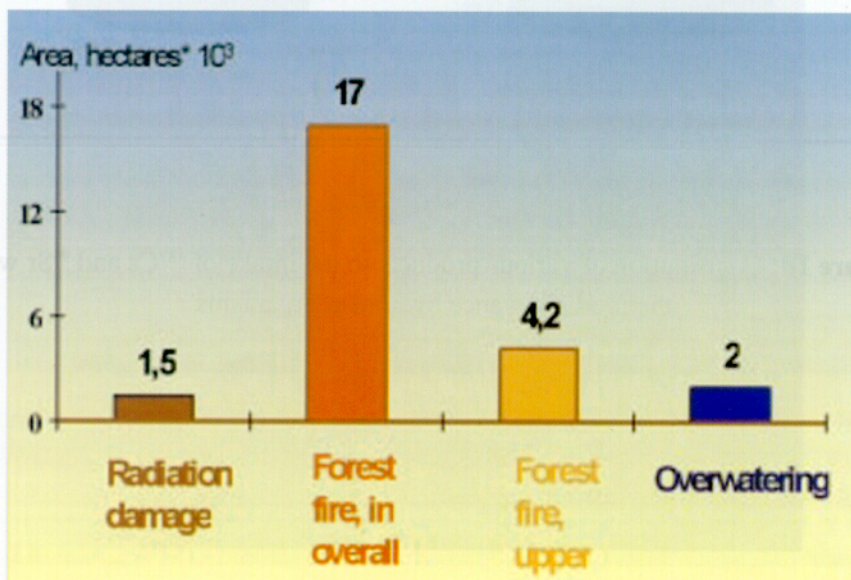


Figure 6: Structure of forest damage in the Chernobyl Exclusion Zone

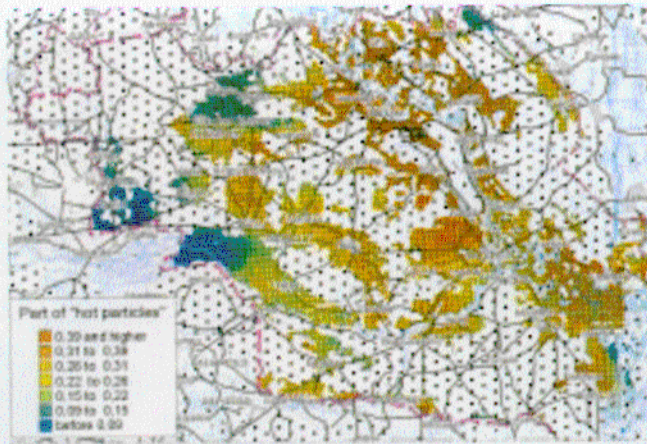


Figure 7: Map of «fuel contamination» of the CheNPP exclusion zone

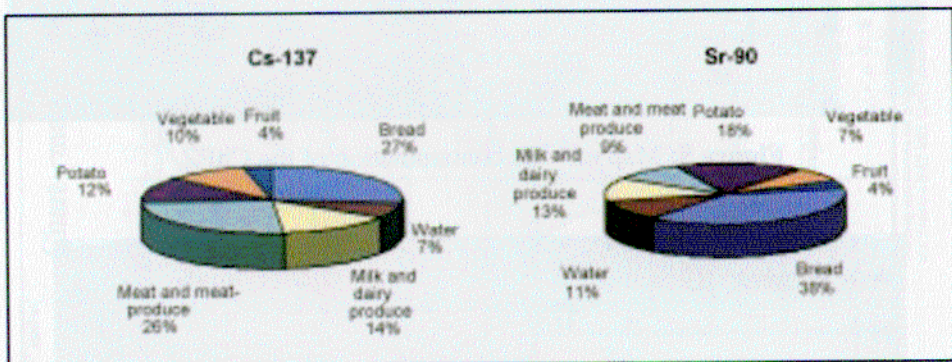


Figure 10: Contribution of various products to the intake of ^{137}Cs and ^{90}Sr with the food allowance by human organisms



Figure 13: Total view of flood territory of river Prip'yat, close to the CheNPP

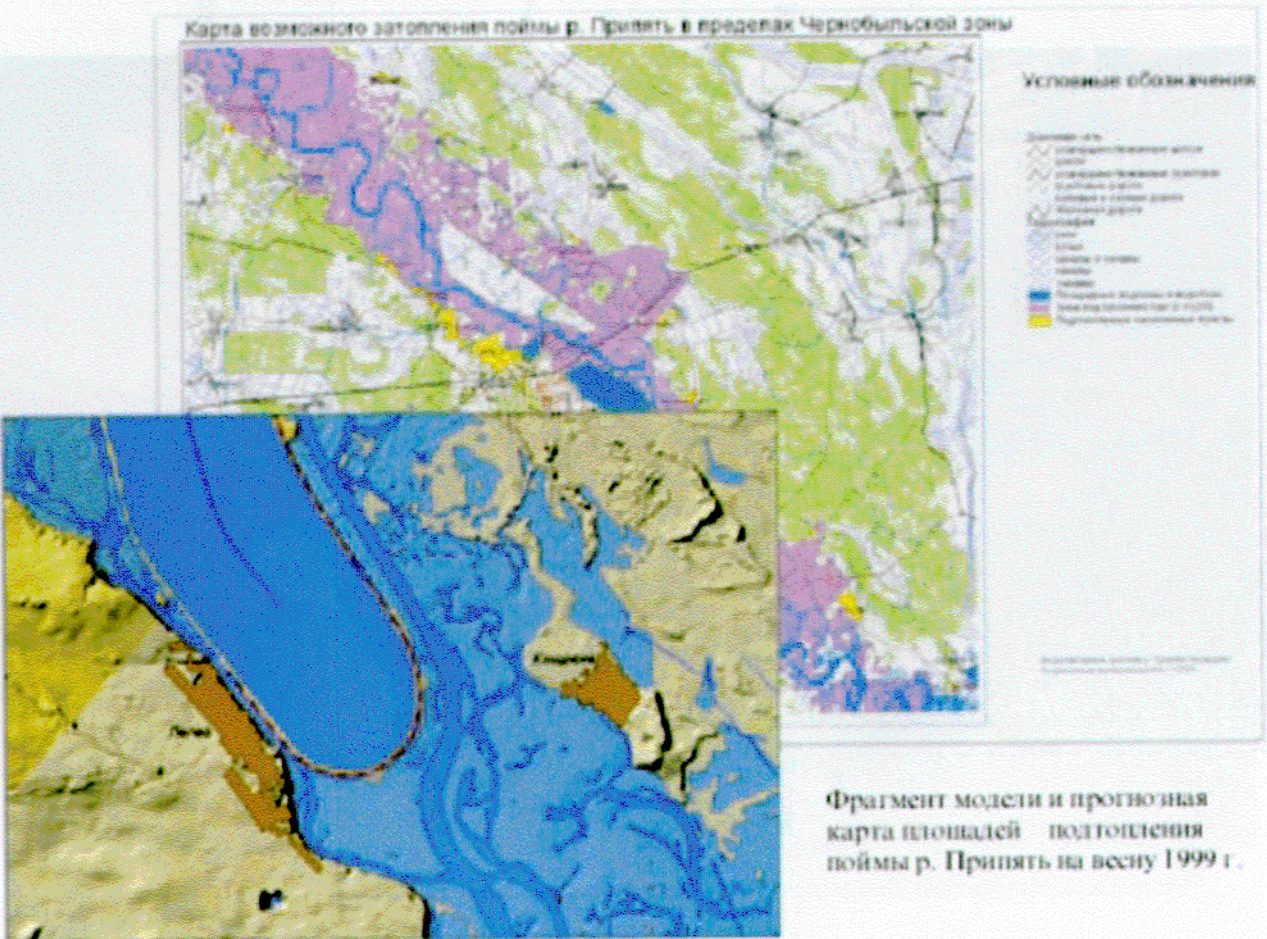


Figure 14: A fragment of the three-dimensional model and forecasting map of a freshet situation

Résumé

Une description générale est faite de la partie ukrainienne de la zone d'exclusion érigée après l'accident de Tchernobyl qui a conduit à la contamination des territoires de l'ancienne URSS. L'historique et l'état actuel sont décrits. Le squelette de la structure de la base de données du système d'information géographique (SIG, anglais, GIS) est présenté. L'utilisation du GIS pour la zone d'exclusion de Tchernobyl est centrée sur l'obtention d'une évaluation de la situation radiologique en soutien à la prise de décisions administratives. Pour montrer quelques résultats concrets d'utilisation des GIS, les principes de base radiologiques nécessaires à la mise en oeuvre des diverses strates d'information de base pour le GIS sont présentés. Un exemple de reclassement de territoires contaminés fait sur la base du risque radiologique lié aux différents sols est décrit. L'utilisation de l'analyse spatiale a permis de modéliser les inondations causées par la rivière Pripjat. Elles sont très importantes au Printemps. Une comparaison des images de satellites avec les résultats du modèle est faite. Ce travail a permis d'éviter de faire des dépenses inutiles pour combattre les inondations du Printemps 1999. Quelques travaux d'établissement des inventaires des radionucléides dans les écosystèmes de la zone d'exclusion et les décisions prises sur la foi des analyses GIS sont présentés. Ces dernières sont donc, en principe, utilisées pour l'évaluation de la situation radiologique, en situation d'urgence, pour répondre aux demandes administratives et comme support pour la production de représentations cartographiques sur papier pour les organisations s'occupant des infrastructures.

Samenvatting

Een historisch overzicht en de huidige stand van zaken in het Oekraïens gedeelte van de Tchernobyl exclusiezone, opgericht na het Tchernobyl ongeval op het grondgebied van de voormalige USSR, worden kort geschetst. De basisstructuur van de Tchernobyl-GIS database wordt gepresenteerd. Het voornaamste doel van het gebruik van GIS in de Tchernobyl exclusiezone is het bepalen van de radiologische toestand voor administratieve besluitvorming. Enige beginselen van radiologische evaluatie die ingezet worden voor het gebruik van de primaire informatie strata in een GIS worden beschreven. Als praktisch voorbeeld wordt de veranderde klasse-indeling van besmette gronden op basis van het radiologisch risico verbonden met de verschillende soorten bodem gepresenteerd. De ruimtelijke analyse heeft het opstellen van een mathematische model van de Pripjat rivier overstromingen die vooral in de Lente belangrijk zijn, mogelijk gemaakt. Dit model wordt vergeleken met satellietbeelden van de overstromingen. Het heeft het maken van werken tegen overstromingen in de lente van 1999 overbodig gemaakt. Enige bepalingen van de radionucléïdenbestanden in de ecosystemen van de exclusiezone en, de op basis van GIS analyse getroffen

beslissingen, worden beschreven. Dus wordt GIS in de Tchernobyl exclusiezone gebruikt voor de evaluatie van de radiologische toestand, de analyse van crisissituaties, het beantwoorden van vragen uitgaand van de overheid en het maken van kaarten voor de infrastructuur organisaties.

Application of Countermeasures to mitigate the consequences of large scale radioactive contaminations.

C.M. Vandecasteele ¹, L. Sombré ² and J.M. Lambotte ²

¹ Radioecology Laboratory, SCK•CEN, Boeretang 200, B-2400 MOL

² SPRI/DBIS, Rue Ravensteinstraat 36, B-1000 BRUSSELS

Abstract:

Accidental releases of radioactivity from a nuclear installation into the environment lead to an increased exposure of population to ionising radiations through different pathways of which the relative contribution changes with time. External irradiation from the cloud and inhalation represent the main exposure sources during the passage of the cloud. In the weeks after the release, external irradiation from deposited radionuclides, inhalation of resuspended radioactive particles and ingestion of contaminated water and food products become the most important contributors but ingestion tends to predominate in the long term.

According to the severity of the contamination, remedial actions can or must be taken to reduce the radiological exposure to acceptable levels. The choice of a specific countermeasure, or of a set of them, will be guided by the release composition and intensity and by the exposure pathway(s) considered as the most critical according to the circumstances (target radionuclide, season, ecosystem). An adequate level of preparedness is essential to assure the highest efficiency in the management of a crisis situation and avoid precipitated decisions and recommendations leading to no, or worse, to adverse effects.

This presentation describes several actions, which could be applied to mitigate the radiological risk for population after a nuclear accident, and discuss their effectiveness, feasibility and drawbacks. It also gives a chronology of the actions taken in Belgium to respond to the local consequences of the Chernobyl accident, and describe the decisions taken subsequently to face more efficiently any future accident.

Introduction

Severe nuclear incidents (3 on the INES¹) and nuclear accidents (4 to 7 on the INES) imply the disruption of the protective barriers of the installation of concern and lead to releases of radioactivity into the environment. Radioactive elements discharged into the atmosphere or water bodies result in an increased exposure of populations to ionising radiations through different pathways of which the relative contribution changes with time:

- during the accident, exposure is essentially due to immersion in the radioactive plume and inhalation of gases and particles;

¹ INES: International Nuclear Events Scale [17]

- in the following days or weeks, external irradiation from deposited radionuclides and inhalation of resuspended particles constitute the main exposure sources;
- but, as time is going on, the uptake of radioactivity with the diet becomes progressively the major contributor to the human exposure.

Depending on the severity of the accident, on the intensity of the deposition and on the contamination level measured or expected in food products, application of countermeasures can be desirable, and sometimes peremptory. They aim to reduce the risks to populations living on the plume trajectory or consuming plants and animal products from the contaminated zones.

Remedial action will be taken:

- to avoid deterministic effects,
- to limit as much as possible the individual long-term risks (cancers, psychological effects, ...) from radiations as well as from the considered countermeasure, and
- to keep the collective dose as low as reasonably achievable, taking into account social and economical costs.

Any action taken in an emergency situation must be justified after consideration of the medical, sociological, economical and ethical aspects. Of course, depending on the peculiar circumstances of an accident (e.g. snowy or icy roads, evolution of the accident, ...), the balance between the radiation and the non-radiation risks may appreciably change; this requires and justifies a certain degree of flexibility in the selection of intervention levels. Therefore, general indicative ranges (instead of thresholds) have been set up (table 1). In a real and specific situation, however, working intervention thresholds will be defined; these limits will be chosen in the lower part of the indicative ranges, unless soundly justified. The maximum values could be overcome in extreme situations, but in any case the intervention limits set up may never reach the threshold for acute effects.

Table 1: Indicative dose equivalent ranges recommended in Belgium for application for prompt interventions.

Action	Indicative ranges for intervention (dose equivalent – mSv)
General sheltering (up to 24h)	5-15 (whole body dose)
Stable iodine prophylaxis	50- ... ^a (thyroid dose by inhalation for sheltered people during the cloud passage)
General evacuation	50-150 (whole body dose integrated over 2 weeks for sheltered people during the cloud passage)

^a The indicative ranges will possibly be adapted for each nuclear installation according to the peculiarities of the local population

In order to limit the dose to the populations, several actions can be taken:

- *preventive* countermeasures like evacuation, sheltering cattle and vehicles, harvesting ripe fruits and vegetables, covering animal feeding stuff (hay, silage, ...) could be recommended, depending on the time available before the plume arrival;
- *immediate* counter-measures like sheltering will be recommended to protect people during the passage of the cloud;
- during the *early* phase, remedial actions such as evacuation of populations, washing or removal of the contaminated surfaces and water spraying to reduce resuspension will be suggested;
- in the *medium-* and *longer term*, the main target of the remedial actions will be to limit the ingestion of radionuclides along with the diet by controlling the contamination level in the foodstuffs, mainly agricultural products in the case of continental populations.

Pre-emergency protective measures

Prevention is better than cure. Therefore, if time is available, for example when the release can be delayed by confining for a while the radioactive gases within the installation building, evacuation of population and pets for a limited period could be considered. The evacuation of cattle, however, might be less evident. Animals grazing outside could be brought back from their pasture to their stall where they will be sheltered and fed with uncontaminated stored feeding stuffs (hay, silage, concentrates, ...) and uncontaminated water (e.g. ground water). Dairy cattle must be milked at regular interval, therefore in case of population evacuation for more than 12 hours, measures should be taken to allow a limited number of volunteers to stay in or come back to the evacuated zones with all the necessary protection requirements to milk the cows.

Avoiding direct contamination of plants used for human or animal feeding, when possible, is always an efficient way to save dose and reduce the post-accident problems of uncontaminated food and forage supply. Greenhouses will be closed and ventilation will be stopped. Stored feeding stuffs will be protected from direct contamination (barn, plastic sheets, ...). Potable water pumping from exposed surface water bodies will be interrupted.

Immediate remedial actions

During the passage of the radioactive plume, the priority must, of course, be given to the protection of people still present in the areas situated along the plume trajectory, in order to limit their external exposure and contamination by inhalation during the passage of the cloud. Sheltering and stable iodine prophylaxis are the most effective measures. If iodine administration (to saturate the thyroid with stable iodine and limit the uptake of radioiodine by this gland) is decided, it should best be applied a few hours prior to the arrival of the radioactive cloud to be as effective as possible.

Early remedial actions

If it was not possible to stall the cattle before the cloud passage, it is recommended to leave the animals outside, in order not to expose people directly to the radioactive plume. The cattle will be brought back to the farm as soon as acceptable levels of radioactivity in air are restored. The farmer will give the animals a shower to eliminate the contamination present on the skin and fur and then keep them under shelter with stored feed to allow the biological elimination of, at least, part of the radioactivity incorporated during the early exposure. The animals and animal products will be regularly monitored to insure compliance with regulations prior to their introduction onto the market.

As soon as possible after the passage of the radioactive cloud, sprinkler irrigation with underground water, when available, may be applied to leach down to the soil the radioactivity from the aerial parts of standing vegetation that should be maintained (fruit trees, ...). Agrotechnical countermeasures to be applied before and during deposition of radioactive fallout have been discussed in more detail by Willrodt [42].

Population from heavily contaminated areas could be evacuated with their domestic animals. Cattle should also be moved to non/less contaminated area, providing that enough clean feeding stuff is available in the hosting zones. Vehicles, animals and material leaving the evacuated zones should be controlled and, possibly cleaned to avoid radioactivity redistribution. Access to the affected zone should be restricted.

The radioactive contamination levels in drinking and irrigation water, foodstuffs and animal feeding stuffs must be measured; if necessary, their consumption must be forbidden. Restriction and alternative supplies should be found.

Table 2: Maximum permissible levels for radionuclides in foodstuffs and animal feeding stuffs.

Radionuclides	Human food stuffs (Bq kg ⁻¹) ^{a, b}					Animal feeding stuffs ^{a, c} (Bq kg ⁻¹)
	Baby food	Dairy products	Other	Minor ^d	Liquids	
Radiostrontium	75	125	750	7500	125	
Radioiodine	150	500	2000	20000	500	
Pu & transuranics	1	20	80	800	20	
Other radionuclides ^e (T _{1/2} > 10d)	400	1000	1250	12500	10000	Pig: 1250 Poultry, lamb & calf: 2500 Others: 5000

^a Limits for dry and concentrated products must be calculated on the base of rehydrated or diluted product ready for consumption.

^b according to art. 7 of Euratom 3954/87 [8] modified by Euratom 2218/89 [9].

^c according to Euratom 770/90 [10]

^d Minor foodstuffs represent products of which the annual consumption is less than about 10 kg y⁻¹ like spices and condiments.

^e ¹⁴C, ³H and ⁴⁰K are not included in this group.

MEDIUM- AND LONG-TERM REMEDIAL ACTIONS

For limiting the contamination in plant products for human and animal consumption

Several techniques are available to reduce the indirect contamination of the vegetation [1, 4, 16, 18, 19, 21, 24, 26, 32, 40]:

- removal of contaminated vegetation

- removal of the contaminated soil surface layer
- (deep-) ploughing
- addition of organic and mineral fertilisers; liming of acidic soils
- selection of plant species
- addition of clay minerals, zeolites and/or chelating agents
- use of agricultural lands for alternative purposes
- ...

Some of these countermeasures also contribute to a significant reduction of the external irradiation and contamination by inhalation of resuspended particles.

- Removal of contaminated vegetation

The vegetation present at the time of an accident and exposed to direct deposition can be contaminated to such an extent that it will remain unfit for human and animal use, even if the contamination level is, later on, reduced by weathering processes, dilution by growth and/or limited translocation to edible parts or industrial processing. In such a case, this highly contaminated vegetation (grass, crops, forest trees) can be harvested and should be treated as radioactive waste. Depending on the fraction of radioactivity intercepted by the standing crops, this practice may result in an effective decontamination of the affected area but also produces huge amounts of waste material. For crops giving dense ground coverage, and where prompt action is taken, removal of as much as 80% of the contamination may be expected. Moreover, the effectiveness of crop removal seems to be better when the contamination is applied in wet form as compared to application in the dry form [32].

An alternative consists to bury the vegetation into the soil by (deep-)ploughing. In some cases, it might be necessary to chop the crop first to facilitate subsequent ploughing and to promote decomposing processes [24]. Although ploughing-in of contaminated crops is a simple way of ensuring that radioactivity does not immediately enter the food-chain, it may increase the long-term problems. Therefore, this option should only be considered when it is known that the radioactivity thus incorporated into the soil will not re-enter the food-chain by root uptake, for example because it is short-lived or highly insoluble [33]. Practically, ploughing-in of contaminated plant material is most efficient when the interception by the plant aerial part is small as compared to the total deposition.

When the radiocontamination in plants does not exceed by far the intervention levels, it can be reasonable to take advantage of the action of ecological processes to diminish the radioactivity content down to an acceptable value. For instance, the expected contamination level at maturity in the edible parts of cereals contaminated in an early development stage may be low enough, so that there may be no need to destroy the crop. A respite of two weeks before allowing the cattle to graze tends to decrease the contamination in pasture grass by a factor of 2 [32].

- Removal of surface soil

In the first months after an accident, most of the radioactivity deposited onto the soil remains located in the surface layer and is moved but rather slowly to deeper horizons. Removal of a shallow layer (up to 5 cm) of soil by mechanical means (including vacuum cleaning for dry soils or forest litter) therefore appears as a very effective decontamination method preventing further contamination of vegetation, resuspension and inhalation of radioactive dust and external irradiation.

Removal by vacuum can be performed directly. This technique has been applied with success in the Nevada desert and proved to be very effective in fine terrain [26]. Scraping with

bulldozers should be preferably performed on wet soil to avoid dust production. Oil spraying has also been used to reduce dust resuspension. An alternative method starts with temporary fixing of the activity and soil particles in the top layer by spraying artificial polymers (polyacrylates, carboxy methyl cellulose derivatives, polyurethanes, ...) or by sowing clover or grass to form a sod which can be removed by conventional equipment [19]. Mechanical removal of soil may be not practicable in stony lands and rocky hills, and should than be replaced by hand digging.

This countermeasure is rather expensive and always generates huge volumes of radioactive waste. For instance, a 5 cm layer of soil over an area of 1 ha has a volume of 500 m³ and a mass of about 700 t, and every additional 1-cm layer of soil removed generates an extra mass of 140 tons [32, 40]. On low quality land, the fertility of the soil may drastically be affected by removing part of the more fertile upper soil layer. Depending on the techniques used, the type of the terrain and soil, and the thickness of the removed soil layer, the removal of a surface soil layer allows to reduce the surface activity by some 70 to almost 100% [19, 32, 40].

- (Deep-)ploughing

Conventional ploughing (to a depth of 20-30 cm) causes an important dilution of the radioactivity within the whole ploughing layer, reducing the contamination of the upper soil layers and, subsequently, the uptake by shallow-rooted plants such as grass and clover. It also limits exposure due to resuspension and decreases the external exposure. In general, however, the efficiency of normal ploughing in terms of reduction in the surface radiation level and suppression of radionuclide uptake by plants is rather low, with reduction factors of about 1.5 to 2 on the average [1, 22, 40]. Furthermore, the effect seems to be dependent on the radionuclide. After surface contamination of wheat at the vegetation stage of 3 leaves, ploughing and re-sowing reduced radiocaesium activity levels in straw and grain by a factor of three and two respectively as compared to the unploughed control; on the contrary, radiostrontium activity level in straw are similar but that in grains increased by a factor of 2 [39].

Deep-ploughing buries the radioactively contaminated soil layer below the rooting zone and has proved to be a more effective way to reduce the uptake by plants. In Southern Urals, which were contaminated by ⁹⁰Sr after an accident at Kyshtym (1957), good results were obtained with ploughing to a depth of 50 cm. However, depending on the technique used, deep-ploughing may disturb the soil profile and bring to the surface infertile soil horizons.

- Application of fertilisers

Agrochemical amendments may be applied to contaminated soils to reduce the ingestion dose caused by the transfer of radionuclides from soil to food products. Basically, any measure which improves the fertility status of the contaminated soil and the productivity of crops grown on it, reduces the radioactivity levels in these crops [1]. Furthermore, the potential effect that fertilisation may have in reducing the transfer of radiocaesium and radiostrontium from soil to plants is inversely related with the original nutrient status of the soil [25].

Potassium (potash) application is the best known effective soil treatment for reducing the radiocaesium content in plants, because of the competition between the two elements for plant uptake. The effectiveness is highest in soils with a low exchangeable potassium status where a reduction factor up to 5 can be obtained [1, 27]. The addition of K-fertilisers can also reduce the radiostrontium transfer by some 20% [28]. Application of nitrogen fertilisers resulted in some cases in an increased radiocaesium uptake by plants [1, 28], due to the higher potential

of ammonium to desorb radiocaesium from the caesium specific sorption sites. Application of calcium (lime) is recommended in acid soils and soils with a low calcium status to reduce the uptake of strontium by plants, on one hand through a competition between the two elements and, on the other hand, by an increase of the soil pH and the increase in the number of pH dependent sites [27, 28]. In acidic organic soils, however, liming may increase the radiostrontium uptake due to the higher selectivity of organic matter for calcium as compared to strontium [28]. Liming also contributes to a decrease of the caesium availability by promoting its sorption on the highly caesium-selective frayed edge sites on micaceous minerals [41]) and that of actinides (precipitation), but excessive quantities are potentially harmful to the vegetation as it may cause a reduction of the availability of many important micronutrients [27, 29]. Phosphate fertilisers, sulphates and silicates can be used to (co-)precipitate the strontium as insoluble salts, but this action may also reduce the availability of other essential nutrients when applied at high rates [27].

In the case of a mixed deposit of activity, the positive effects of one soil-based countermeasure for reducing the soil-to-plant transfer of a specific radionuclide may be offset by the negative effects caused by this treatment on other radionuclides present. Combination of different treatments (e.g. K-fertiliser and lime) may result in either positive or negative combined effects [27-29].

- Addition of aluminosilicates

Clay-type minerals (illites, bentonites, vermiculites, ...) and zeolites added to soils with an initial low clay and organic matter content increase the soils CEC and selectivity for some radionuclides (radiocaesium and radiostrontium) and favour the sorption of, mainly, cationic radionuclides [1, 22, 28, 29, 33]. The reported effects vary between a factor of 1 (no effect) to 2.5 for doses of some 40 tons per ha. In order to obtain a maximal effectiveness, the minerals added should be very well mixed with the contaminated soil layer. This becomes difficult when the contaminated soil has already been ploughed prior to the application of these minerals. In some cases, negative effects have been reported, on both uptake of radionuclides and crop yield [30]. Furthermore, this remedial action is rather expensive and causes practical problems at application rates of several tons ha⁻¹.

- Addition of organic matter

Increasing the organic matter content in a soil also enhances the binding sites concentration and the sorption of radionuclides, especially radiostrontium, on the solid phase while decreasing their concentration in the soil solution [27, 29]. Sapropell was used with a great effectiveness in the NIS after the Chernobyl accident [29]. This product is derived from lake sediments and is composed of a mixture of mineral and organic material with a naturally high nutrient content. It is abundantly available in the NIS countries and can thus be applied at high rates and rather low costs. Furthermore, application of large doses of sapropell do not have any detrimental side effects on plant or animal health. As to the uptake of radiocaesium and radiostrontium by plants, reduction factors of up to 5 are reported for doses varying between 50 to 150 tons ha⁻¹. In the case of radiocaesium, this effect is most probably due to the increased fertility status of the soil rather than to the increased adsorption capacity of the amended soil for radiocaesium [38].

- Application of chelating agents

Various chemical binders are commercially available as potential countermeasures to bind the radionuclides under non available forms for plant uptake or under soluble forms that will be

lixiviated below the rooting zone. Their price and/or undesirable side effects precludes their use on a wide scale.

- Selection of plant species

Limiting the dose to the population may also be achieved by cropping deep-rooted plants which exploit the soil mainly below the contaminated layers (e.g. alfalfa, corn) or plant species used for grain production (grains generally exhibit lower transfer factors than other plant organs) or for cattle feeding (radioactivity in animal products is generally less than in plant products). Inter-species differences in radiocaesium uptake of up to a factor of 10 have been observed between the major varieties of farm crops cultivated in the Chernobyl affected regions [1]. For different cultivars of agricultural crops, inter-variety differences in the contamination level of up to a factor of 4.5 were reported [1] so that the choice of the good variety brings an evident benefit.

At higher contamination levels, the contaminated land can be used for seed, fibre (flax), oil (oil seeds) or methanol production, with a reduction factor of the radiation dose of more than 10 [2].

- Radical amelioration of meadows

In some regions, like for instance in the Chernobyl affected regions, amelioration of meadows may be one of the most effective ways to reduce the radiation dose of the population. This is due to the role of milk as the principal source of radiation dose: up to 70% of the internal dose to the population of the Chernobyl-affected region was due to the consumption of contaminated milk. Amelioration of low productivity grasslands into high productivity artificial pasture can be obtained by a combination of ploughing, liming, dressing with organic and mineral fertilisers and repeated re-sowing, and leads to a reduction of the transfer of radionuclides into farm products by a factor of 10 or more [1, 29].

- Use of agricultural lands for alternative purposes

When the contamination is too high to allow cattle breeding or to produce annual plants which can be used for consumption or other purpose, planting of forest trees for timber and paper production allows to wait for 30 years or more, depending on the tree species, during which the radioelement will decay. Such remedial action is expected to reduce the internal radiation dose to the population by more than a factor of 100, but has extremely high economic and social consequences for the considered local (agricultural) population [2].

For limiting contamination of animal products

The available methods to reduce the transfer of radionuclides to animal products involve:

- limiting intake
- reducing uptake
- increasing excretion.

These different methods have recently been reviewed by Coughtrey [7].

Intake can be limited in practical circumstances by removing completely the animals from contaminated feed, or by mixing and dilution of radiocontaminated feed with non-contaminated fodders. When the animals have to be used for meat production, a transition

period could be foreseen before they are slaughtered during which they would be fed uncontaminated or less contaminated feed in order to allow them to be decontaminated by biological processes until they reach an acceptable contamination level. This approach has been applied in the UK for upland sheep : a considerable decrease in the radiocaesium concentration in muscle is obtained when lambs are brought from highly contaminated upland pastures to much less (100 to 200 times) contaminated lowland pastures for fattening before being sold to the food market [15].

However, when uncontaminated feeding stuffs are not sufficiently available (stored fodders are generally exhausted in spring) or may not be imported, then additives can be used to limit the radionuclides uptake in the gastro-intestinal tract and/or to enhance the metabolic excretion of the absorbed radionuclides. Depending of the radioelement considered, several compounds may be used :

- * Alumino-silicates like bentonite, zeolite and vermiculite. Administration of vermiculite flakes (vermiculite) in the diet of dairy cattle reduces the transfer of radiocaesium to milk up to a factor of 8 [14]. Giese [13] demonstrated a significant reduction in radiocaesium concentrations of pigs following addition of *bolus alba* (a primary constituent of kaolin consisting mainly of alumino-silicates) at 5% of the diet. Bentonite (10% of the diet) decreases the absorption of radiocaesium in dairy cows by a factor of 40 [36]. The effect of spreading bentonites (single or repeated applications of 80 g/m²) on pastures grazed by sheep has been investigated by Beresford *et al.* [5]; only the repeated treatment (every 2 d) was found effective in the reduction of the caesium transfer coefficient but was counterbalanced by a loss in animal body weight (18% after 34 d) associated with a decrease in grass intake (39%).
- * Enrichment of the diet in stable elements and stable analogues might be expected to reduce the uptake and retention of radionuclides. An increase of the calcium content of the diet decrease the incorporation of strontium in the skeleton and its secretion in milk. Addition of potassium has been reported to decrease the caesium assimilation under conditions of deficiency in the diet.
- * Prussian Blue compounds show a high efficacy to reduce the contamination of mammals by radiocaesium [34]. One of them, the ammonium-ferric-cyano-ferrate(II) (AFCF), has been tested under practical feeding conditions after Chernobyl and proved to be efficient [12].
- * Increasing the fibre content and the roughage of the ruminants diet may also help to limit caesium absorption [20, 43].
- * 5% sodium alginate added to contaminated milk fed to young swines reduces by a factor of 6 the strontium content in the body [37]. The same authors reported a slight reduction in radiocaesium retention in swines under the same conditions. The transfer of strontium to milk is reduced by giving to cows a feed ration containing 5-7% Na-alginate [35].
- * Administration of chelating agents of the group of amino-acetic acids are used to enhance excretion of Pb, Cd, Mn, Hg, Pb in humans and have been experimentally used to enhance the excretion of ⁶⁵Zn and Pu. In the case of Pu, the best results are obtained with DTPA, followed in efficiency by DDETA. Zirconium citrate and phosphate compounds, among them hexametaphosphate are also efficient when administered immediately [23, 34].

To reduce contamination levels in feeding stuffs

When confronted with unacceptably heavily contaminated feeding stuffs, industrial food processing may provide an interesting alternative for reducing the contamination levels in products consumed by humans.

The problem of the ^{131}I contamination in food products may be solved very easily if it is possible to delay consumption to allow physical decay. This can be achieved by production and storage of milk powder or cheese, storage of deep frozen meat and the preparation of deep frozen soup concentrates with ^{131}I contaminated vegetables.

For other radionuclides for which the physical half-life is too long to envisage decay during storage, other techniques must be used.

Washing of vegetables can remove a fraction of the external contamination. Grain, after removal of the external envelopes, can be used for preparation of white flour and white bread. Milk can be treated by passage on exchange resins to remove strontium and possibly caesium. Milk can also be used for the preparation of storable by-products in which the contamination will be lower (butter, cheese, ...). Some culinary methods of food preparation can also be used to limit contamination ingested by man.

The Chernobyl experience in Belgium [3]

On April 28, 1986 the Belgian Authorities become aware of a nuclear accident at one of the reactors at Chernobyl in Ukraine. Immediately, the Ministry of Foreign Affairs contacts our embassies in Moscow, Vienna (relation with the International Atomic Energy Agency) and Stockholm (Scandinavian countries were the first countries to report an abnormal increase of radioactivity in the air).

On April 29, our embassies in East countries are requested to provide as much information as possible concerning the accident and its consequences. The State Secretariat for Environment organises a meeting with the SPRI/DBIS (Service for Protection against Ionising Radiations) and the IHE (Institute for Hygiene and Epidemiology) to evaluate the situation. The different institutes (IHE, SCK•CEN [Nuclear Research Centre], IRE [Institute for RadioElements], IRM/KMI [Royal Meteorological Institute]) and Belgian nuclear plants (Tihange and Doel) involved in environmental radioactivity measurements and control are asked to intensify their monitoring.

On May 2, an increase of radioactivity is observed in Belgium. The frequency of measurements is increased to follow the evolution of the radiological situation hour by hour. The State Secretariat for Environment gathers representatives from concerned Ministries and scientific institutes to evaluate the situation and co-ordinate the measurements. This group defines reference levels for the contamination of the food chain (^{131}I is considered at first at the most critical radionuclide). The population is informed through the media's.

On May 4, the reference level for ^{131}I on herbage (1000 Bq m^{-2}) is exceeded. Therefore, the State Secretariat for Environment make the recommendations for dairy cattle to be stalled and fed with store feed, and for fresh vegetables to be carefully washed prior to consumption. An information centre is set up to answer the numerous questions from the population.

From May 5 onwards, discussion are started at the level of the Economic European Community to set up reference (or tolerance) levels for foodstuffs consumption, import and export. The Ministry of Agriculture has to intervene on several occasions to release Belgian products blocked at foreign borders. In absence of agreement between the EEC member states, the Ministry of Public Health requests from a group of experts to define maximum permissible levels for ^{131}I in milk, dairy products and leaf vegetables. The limits are set up at 500 and 1000 Bq kg^{-1} for milk (+ milk derivates) and leaf vegetables respectively. These limits were valid for the first ten days, between May 6 and May 15, and were decreased by a factor of 2 every 10 days thereafter to cope with ^{131}I radioactive decay. The Inspection of Foodstuffs is in charge of organising the sampling on the market. In a first phase, the control focussed on ^{131}I ; later on radiocaesium became the target element.

On May 8, it becomes clear that the radioactivity in milk (a maximum value of 150 Bq l⁻¹ was reached on May 5) remains below the defined reference level of 500 Bq l⁻¹ and the recommendation of keeping the cattle indoors is withdrawn. The control at the Dutch border is reinforced to prevent fraudulent import of spinach aimed at disposal.

On May 22, recommendations are given regarding the manipulation and disposal of used filters from air-conditioning systems (use of masks, gloves and caps by the workers).

The effective external dose increase due to the Chernobyl accident for the Belgian population was later estimated to about 40 µSv for May and June together and decreased to less than 10 µSv month⁻¹ thereafter. A very conservative assessment of the dose to the thyroid amounted to 4 mSv for the one-year child, 3 mSv for the 10-year child and 1 mSv for the adult; the corresponding effective doses (external and internal) were 0.25, 0.20 and 0.10 mSv. For comparison, the annual effective dose from natural radioactivity in Belgium varies in a range of about 1 to 2 mSv y⁻¹, according to the region.

Post-Chernobyl developments in Belgium

As a consequence of the problems and experience gathered during the management of the Chernobyl crisis:

- The terms and conditions for the environmental radioactivity remote-monitoring network (TELERAD), already in gestation since 1984, was almost ready in 1986 when the Chernobyl accident happened [31]. Due to the circumstances, the project was temporally frozen to face more urgent priorities. In 1987 it was reactivated but also re-evaluated at the light and lessons from the recent events. The network was namely redesigned to cover the whole territory with a tight grid, including the Belgian borders.
- The existing emergency plans were reconsidered at the light of the lessons learned and updated. Periodic emergency exercises are organised to train the many different actors, check their preparedness and test the procedures for unforeseen problems.
- As foreseen in the Belgian emergency plans, the distribution of stable iodine tablets and information leaflets to populations and collectivities (day-nurseries, schools, mills and farms, children's and senior's homes, ...) was organised in March 1999 as described in [11].
- The creation of a Federal Agency for Nuclear Control (FANC) was decided (Belgian law of 15/04/94). This agency gathers the concerned services of the Ministries of Public Health and Employment.
- An inventory of the landscape use around the Belgian nuclear plants (including the French Chooz plant) was carried out at the request of the SPRI/DBIS [6].
- Radioecological research in different institutes, sponsored at the national and European level, has mainly focussed on the behaviour of radioactive aerosols released in accidental situations and on the application, feasibility and efficacy of various agricultural countermeasures. This effort will be continued in the coming years and new proposals have recently been introduced in the framework of the 5th Programme "Research & Development" of the European Commission.

CONCLUSIONS

A new severe nuclear accident like the Chernobyl is highly improbable, but unfortunately still not impossible. However, limited releases may not be excluded, even in developed countries. Preparedness is the best solution to avoid panic and confusion and the Belgian Authorities have given themselves the necessary tools to respond to such possibility. A dense remote-monitoring network will be able to give a prompt alert; emergency plans and periodic simulation exercises will allow a rapid and well co-ordinated reaction. If necessary, sets of sound remedial actions are available.

Appropriate countermeasures will, of course, be selected taking into account their economical and social costs and their efficiency to reduce the population exposure to ionising radiations. But their feasibility must also be considered, namely in terms of the common availability of material and tools to be used. The recent problem caused by animal feeding stuffs contaminated by dioxin has demonstrated how quickly milk storage capacity at the farms or in dairies could be saturated. This crisis also pointed out the problems encountered by producers due to the imposed delay in chicken, pork or beef slaughtering. It is therefore essential that actors from the food industry sector (from the farmer to the super-market) are involved to discuss the practical feasibility of potential remedial actions.

The countermeasures will be selected depending on the circumstances (radionuclide(s) of concern, ecosystem and pathway considered). They may be used separately or in combination. But before deciding on the application of any remedial action, one should pay attention to the fact that a countermeasure specific for one radionuclide is not necessarily effective for others and may produce undesirable effects on other radioelements in the case of a mixed deposit. Moreover, one should verify that the countermeasure(s) are not harmful to crops, animals and human by modifying the nutrition balance (partial sterilisation of soil by deep-ploughing, induction of deficiencies in micronutrients, ...).

Social aspects have to be considered and the cost of social life disruption has to be accounted for in the ALARA approach. Finally, the consumer attitude towards products, even clean according to the international standards but originating from radioactively affected area, is an essential parameter to deal with. In other words, it would be useless to spend money, efforts and exposure dose to workers to clean products that will be disregarded by consumers. In this regard, international solidarity, at least at the European Union level, still needs to be improved.

BIBLIOGRAPHY

1. Alexakhin R.M. (1993), Countermeasures in agricultural production as an effective means of mitigating the radiological consequences of the Chernobyl accident. *Sci. Tot. Environ.* 137, p. 9-20.
2. Alexakhin R.M., M.J. Frissel, E.H. Schulte, B.S. Prister, V.A. Vetrov and B.T. Wilkins (1993), Change in land use and crop selection. *Sci. Tot. Environ.* 137, p. 169-172, 1993.
3. Anonymous (1986), Rapport au Parlement sur les conséquences de l'accident nucléaire de Tchernobyl et les mesures qui ont dès lors été prises, Session du 24/10/1987, Chambre des Représentants 644/1 - 86/87: 115pp.

4. Baes C.F. III, C.T. Garten Jr, F.G. Taylor and J.P. Witherspoon (1986), The long-term problems of contaminated land : sources, impacts and countermeasures, Oak Ridge National Laboratory, Environmental Science Division, Publication 2593, ORNL-6146.
5. Beresford N.A., C.S. Lamb, R.W. Mayes, B.J. Howard and P.M. Colgrove, The effect of treating pastures with bentonite on the transfer of ¹³⁷Cs from grazed herbage to sheep, *J. Environ. Radioactivity*, 9: 251-264 (1989).
6. Burton O., C.M. Vandecasteele, C. Chalmagne and R. Kirchmann (1991), Etude du transfert de radionucléides accidentellement libérés dans les produits agricoles dans le but de développer des contre-mesures adaptées, Rapport Final contrat SPRI RIS-JML-DF-5067.
7. Coughtrey P.J. (1993), Effects of countermeasures on radionuclide transfer to animal products, Final report, IUR Pub R-9301-03, 54pp.
8. Euratom (1987), Council Regulation n° 3954/87 of 22/12/1987 laying down maximum permitted levels of radioactive contamination of foodstuffs and feedingstuffs following a nuclear accident or any case of radiological emergency, Official Journal of the European Communities L146 of 30/12/1987, Luxembourg.
9. Euratom (1989), Council Regulation n° 2218/89 of 18/07/1989 amending Regulation (Euratom) n° 3954/87 of 22/12/1987 laying down maximum permitted levels of radioactive contamination of foodstuffs and feedingstuffs following a nuclear accident or any case of radiological emergency, Official Journal of the European Communities L211 of 22/07/1989, Luxembourg.
10. Euratom (1990), Council Regulation n° 770/90 of 29/03/1990 laying down maximum permitted levels of radioactive contamination in animal feedingstuffs following a nuclear accident or any case of radiological emergency, Official Journal of the European Communities L83 of 30/03/1990, Luxembourg.
11. Frühling J., P. Smeesters, L. Van Bladel and A. Wambersie (1998), Accidents nucléaires et prophylaxie par l'iode, *Louvain Med.*, 117: 334-354.
12. Giese W.W. (1988), Ammonium-ferric-cyano-ferrate(II) (AFCF) as an effective antidote against radiocaesium burdens in domestic animals and animal derived foods, *Br. Vet. J.*, 144 : 363-369.
13. Giese W.W. (1989), Countermeasures for reducing the transfer of radiocaesium to animal derived foods, *Sci. Total Environ.*, 85 : 317-327.
14. Hazzard D.G. (1969), Percent caesium-134 and strontium-85 in milk, urine and faeces of goats on normal and verxite-containing diets, *J. Dairy Sci.*, 52: 990-994.
15. Howard B.J., N.A. Beresford, L. Burrow, P.V. Shaw and E.J.C. Curtis (1987), A comparison of caesium-137 and 134 activity in sheep remaining on upland areas contaminated by Chernobyl fallout with those removed to less active lowland pasture, *J. Soc. Radiol. Prot.*, 7 : 71-73.
16. Howard B.J. and G. Desmet (Eds.) (1993), Relative effectiveness of agricultural countermeasure techniques (REACT). Special issue of *Sci. Tot. Environ.*, Vol. 137.
17. IAEA (1990), International nuclear events scale, IAEA Vienna, 1st Revision, March 1990.
18. Iranzo E. (1989), Applicability of various scenarios of countermeasures, IUR working party on the Agricultural countermeasures following an accidental release of radionuclides, Liège 19-21 June 1989.
19. Jouve A., E. Schulte, P. Bon and A.L. Cardot (1993), Mechanical and physical removing of soil and plants as agricultural mitigation techniques. *Sci. Tot. Environ.* 137, p. 65-79.

20. Karpenko A.F., V.A. Shumilin and A.F. Gvozdik (1991), Assessment of factors governing radiocaesium transition along the chain feed-animals, *in* Problems of elimination of the consequences of the Chernobyl accident - five years later : results, problems and prospects, Vol. I, Obninsk (Russia).
21. Kirchmann R., J.N.B Bell, P.J. Coughtrey, M. Frissel, T.E. Hakonson, W.C. Hanson, D. Horrill, B.J. Howard, L.J. Lane, C. Myttenaere, W.L. Robinson, C. Ronneau, G. Shaw, W.R. Schell, J. Van Den Hoek, A. Konoplyov and N. Zezina (1993), Terrestrial pathways, in *Radioecology after Chernobyl*, F.E. Warner and R.M. Harrison Eds., John Wiley & Sons, 101-176 .
22. Konoplev A.V., N.V. Viktorova, E.P. Virchenko, V.E. Popov, A.A. Bulgakov and G.M. Desmet (1993), Influence of agricultural countermeasures on the ratio of different chemical forms of radionuclides in soil and soil solution. *Sci. Tot. Environ.* 137, p. 147-162.
23. Lauwerys R. (1972), *Precis de toxicologie industrielle et des intoxications professionnelles*, Duculot, Gembloux.
24. Leising C. and E. Wirth (1990), Evaluation of countermeasures in agricultural and food processing. In: *Environmental contamination following a major nuclear accident (proceedings)*, IAEA-SM-306/67, Vienna.
25. Lembrechts J. (1993), A review of literature on the effectiveness of chemical amendments in reducing the soil-to-plant transfer of radiostrontium and radiocaesium. *Sci. Tot. Environ.* 137, p. 81-98.
26. Marti J.M., G. Arapis and E. Iranzo (1990), Evaluacion de contramedidas para la recuperacion de suelo agricola. In: *Environmental contamination following a major nuclear accident (proceedings)*, IAEA-SM-306/103, Vienna.
27. Nisbet A.F., A.V. Konoplev, G. Shaw, J.F. Lembrechts, R. Merckx, E. Smolders, C.M. Vandecasteele, H. Lönsjö, F. Carini and O. Burton (1993), Application of fertilizers and ameliorants to reduce soil-to-plant transfer of radiocaesium and radiostrontium in the medium to long term: a summary. *Sci. Tot. Environ.* 137, p. 173-182.
28. Nisbet A.F. (1993), Effect of soil-based countermeasures on solid-liquid equilibria in agricultural soils contaminated with radiocaesium and radiostrontium. *Sci. Tot. Environ.* 137, p. 99-118.
29. Prister B.S., G.P. Pereplyatnikov and L.V. Pereplyatnikova (1993), Countermeasures used in the Ukraine to produce forage and animal food products with radionuclide levels below intervention limits after the Chernobyl accident. *Sci. Tot. Environ.* 137, p. 183-198.
30. Rauret G. and S. Firsakova (1993), The transfer of radionuclides through the terrestrial environment to agricultural products, including the evaluation of agrochemical practices. CEC report EUR-16528-EN.
31. Samain J.P., J.M. Lambotte, C. Gill and M. Desmedt (1993), Le réseau TELERAD de la télémessure de la radioactivité en Belgique, 11th conference on power stations, Liège 20-24 Sept. 1993.
32. Sandalls F.J. (1990), Review of countermeasures used in agriculture following a major nuclear accident. In: *Environmental contamination following a major nuclear accident (proceedings)*, IAEA-SM-306/44, Vienna.
33. Segal M.G. (1993), Agricultural countermeasures following deposition of radioactivity after a nuclear accident. *Sci. Tot. Environ.* 137, p. 31-48.

34. Stara J.F., N.S. Nelson, R.J. Della Rosa and L.K. Bustad (1971), Comparative metabolism of radionuclides in mammals: a review, *Health Phys.*, 20 : 113-137.
35. Thompson J.C. Jr, R.A. Wentworth and C.L. Comar (1971), Control of fallout contamination in the postattack diet: in survival of food crops and livestock in the event of a nuclear war, *Proc. Symp. Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, Sept. 1970*, B.W. Benson and A.H. Sparrow Eds., 566-595.
36. Van Den Hoek J. (1980), The influence of bentonite on caesium absorption and metabolism in lactating cow, *Z. Tierphysiol. Tierernahr. Futtermilchde*, 43 : 101-109.
37. Van der Borcht O., J. Colard, S. Van Puymbroeck and R. Kirchmann (1966), Radiocontamination from milk in piglets (swine) : influence of sodium alginate on the $^{85}\text{Sr}/^{134}\text{Cs}$ ratio of the body burden and on the comparative $\text{Sr}^{85}/\text{Ca}^{47}$ absorption, in *Radioecological concentration processes*, Pergamon Press, Oxford - New York, 589-593
38. Valcke E. (1996), L. Moskaltchuk and A. Cremers. The use of spropels in radiocaesium and radiostrontium contaminated soils: a soil chemical approach. Submitted for publication to *Applied Geochemistry*, 1996.
39. Vandecasteele C.M., S. Baker, H. Förstel, M. Muzisky, R. Millan, C. Madoz-Escande, J. Tormos, T. Sauras, E. Schulte & C. Colle (1999), Interception, Retention and translocation of radiocaesium and radiostrontium from a simulated accidental source, in preparation.
40. Vovk I.F., V.V. Blagoyev, A.N. Lyashenko and I.S. Kovalev (1993), Technical approaches to decontamination of terrestrial environments in the NIS (former USSR). *Sci. Tot. Environ.* 137, p. 49-63.
41. Wauters J., L. Sweeck, E. Valcke, A. Elsen and A. Cremers (1994), Availability of radiocaesium in soils: a new methodology. *Sci. Tot. Environ.* 157, p. 239-248.
42. Willrodt C. (1993), Agrotechnical countermeasures to be applied before and during deposition of radioactive fallout. *Sci. Tot. Environ.* 137, p. 21-30.
43. Wilson D.W., G.M. Ward and J.E. Johnson, A quantitative model of the transport of Cs-137 from fallout to milk, *Environ. Contam. Radioact. Mater., Proc. Semin., Vienna* (1969).

Résumé:

En cas d'accident dans une installation nucléaire, la libération de produits radioactifs dans l'environnement conduit à une exposition supplémentaire des populations aux radiations ionisantes au travers de voies diverses dont la contribution relative évolue avec le temps. Durant le passage du nuage radioactif, l'irradiation externe à partir de l'atmosphère et l'inhalation constituent les voies essentielles de l'exposition. Dans les semaines qui suivent le rejet, l'irradiation externe à partir des surfaces contaminées par le dépôt, l'inhalation de particules contaminées remises en suspension dans l'air et l'ingestion d'eau et de nourriture contaminées contribuent de concert à l'exposition. A plus long terme, les voies alimentaires prennent progressivement une part de plus en plus importante et finissent par prédominer. Selon la sévérité de l'accident, des contre-mesures peuvent ou doivent être prises de façon à ramener les niveaux d'exposition en-dessous de seuils acceptables. Le choix de contre-mesures spécifiques, ou d'une combinaison de contre-mesures, sera déterminé par l'intensité et la composition du rejet, ainsi que par les voies d'expositions critiques, compte tenu des circonstances particulières de l'accident (radionucléides critiques, saison, écosystème, ...). Un niveau adéquat de préparation est essentiel pour assurer une gestion aussi efficace que possible d'une situation de crise et éviter des décisions précipitées et des recommandations sans effet, ou pire encore, conduisant à des effets adverses.

Ce document décrit un certain nombre de contre-mesures susceptibles de réduire le risque radiologique pour les populations exposées lors d'un rejet nucléaire accidentel ; il en discute l'efficacité, la faisabilité ainsi que les inconvénients éventuels. Il présente également la chronologie des actions prises par les Autorités belges pour faire face aux conséquences locales de l'accident de Tchernobyl et les mesures décidées ultérieurement pour parer de façon plus efficace à tout accident futur.

Samenvatting

De radioactieve stoffen die vrijkomen tijdens een ongeval in een nucleaire installatie leiden tot een verhoogde blootstelling van de bevolking langs verschillende wegen waarvan de relatieve bijdrage met de tijd schommelt. Aanvankelijk, bij het voorbijtrekken van de radioactieve wolk is de blootstelling vooral te wijten aan externe bestraling en aan het inademen van besmette lucht. In de daaropvolgende weken wordt de blootstelling veroorzaakt door een samenvoeging van bestraling door het radioactieve neerslag, inhalatie van geresuspendeerde deeltjes en het innemen van besmet water en voedsel. Naarmate de tijd verstrijkt gaat deze laatste component de overhand nemen. Tegenmaatregelen kunnen en moeten overwogen worden om het besmettingsniveau beneden de toegelaten grens-

waarden te houden. De aard van deze maatregelen hangt af van de specifieke kenmerken van het ongeval (tijdstip, vrijgekomen radionucleïden,...), het milieu en de mogelijke kritische besmettingsketens. Een voldoende voorbereidingsniveau is onontbeerlijk om doeltreffend te interveniëren tijdens de crisis en om overhaaste en zelfs negatieve ingrepen te vermijden. Voor- en nadelen van een aantal tegenmaatregelen worden besproken, zowel als hun doeltreffendheid. De chronologie van door de Belgische Overheid genomen maatregelen onmiddellijk na het Tchernobyl ongeval om er de gevolgen ervan te bestrijden en ook de later getroffen beslissingen voor mogelijke consequenties te onderscheppen, worden toegelicht.

GESTION ET ANALYSE DES MESURES "TERRAIN" EN SITUATION DE CRIS NUCLÉAIRE

J.-M. Métivier

Abstract

The experience gained during crisis exercises organised by the «Centre Technique de Crise» (CTC) of the IPSN shows the complexity of the operations carried out. The initial treatment chain, from information to analysis of results, has been set up and checked in real terms during the Fessenheim exercise. These data are organised and checked for completeness and relative consistency. Their reliability is carefully assessed before they are entered into the pre-established data sheets for:

- air, soil, water, vegetation, ...

and for the type of measurement:

- dose rate, spectrometry, radioactive concentration.

The link is established with a GIS. The latter accounts for the geographic characteristics of the information and allows mapping.

This cartographic representation meets the requirements of the experts and decision-makers. This treatment sequence is the first link in the expert's evaluation of the data, whether obtained from the field or from code-based data, leading eventually to well to the demand adapted maps.

Résumé

L'expérience acquise lors des exercices de crise organisés au Centre Technique de Crise (CTC) de l'IPSN, a montré que la gestion et l'analyse des mesures d'irradiation ou de contamination radioactive, effectuées dans l'environnement après un accident nucléaire, sont des opérations complexes à mener en situation de crise.

La conception d'une première chaîne de traitement depuis la gestion des informations jusqu'à l'analyse des résultats de mesure a été réalisée et testée, en vraie grandeur, lors de l'exercice Fessenheim.

Un Système de Gestion de Base de Données relationnelles (SGBDr) permet la saisie des informations (fichier, fax, lettre). Celles-ci sont vérifiées et organisées de façon à être complètes pour pouvoir les classer et les comparer entre elles. Lors d'une analyse critique et méticuleuse leur niveau de confiance est vérifié et elles

sont intégrées dans une typologie prédéfinie relative au:

- milieu: air, sol, eau, végétal, etc.
- type de mesures: débit de dose, comptage de radioactivité, spectrométrie

La chaîne de traitement comprend une liaison des données organisées dans le SGBDr avec un logiciel de Système d'information Géographique (SIG). Ce dernier prend en compte la composante géographique de l'information pour en permettre la représentation cartographique. Ces supports, plus communicants que des tableaux, des graphes ou des diagrammes répondent précisément aux questions d'un expert ou d'un décideur.

Cette chaîne de traitement constitue le premier maillon qui permettra, à terme, l'expertise de la validité des données (mesurées sur le "terrain" ou estimées au moyen de codes de calcul) et la création de cartes adaptées à la demande.

Samenvatting

De ervaring opgedaan door het « Centre de Crise » van het IPSN met crisis oefeningen, hebben aangetoond dat het beheer en de analyse van de bestralings- en besmettingsmetingen uitgevoerd in het milieu tijdens de crisis, van complexe aard zijn.

Gedurende de Fessenheim oefening werd het concept van de eerste gegevens-behandelingsketen - van informatie tot analyse - daadwerkelijk getoetst. Een database systeem van geconnecteerde gegevens (SGBDr) maakt het verzamelen van de informatie mogelijk (bestanden, brieven, faxen). De gegevens worden nagezien en verzameld om vergelijkingen, klasseringen te vergemakkelijken. Na een toets op betrouwbaarheid worden ze in een voorbestemd formaat gebracht naar

- milieu: lucht, bodem, water, plant, enz. en
- type meting (dosisdebiet, radioactiviteit, spectrometrie).

De gegevensbehandeling omvat het koppelen van de SGBDr-bestanden met een GIS programma dat rekening houdt met de geografische gegevens. De specifieke vragen van een expert of een beslissingsnemer kunnen zo beantwoordt worden. Dit is het begin van een behandeling van de gegevens dat tenslotte moet leiden tot het valideren ervan, of het nu gaat over terreinmetingen of schattingen. Het eindpunt is het maken van kaarten die aan de vraag voldoen.

COUNTERMEASURES AFTER CHERNOBYL: IMPACT, EVALUATION AND LESSONS

Vasyl Davydchuk

Institute of Geography, National Academy of Sciences of Ukraine
44, Volodymyrska St., Kyiv 10003 Ukraine

Abstract

A number of the administrative, engineering and agricultural countermeasures realised after the Chernobyl nuclear accident were directed towards:

- * minimising the irradiation of the population in the affected territories;
- * reducing the dose rates for the NPP staff and workers in the exclusion zone;
- * avoiding expansion of the radionuclides outside exclusion zone.

Administrative countermeasures were directed towards the relocation of the population from the most heavily contaminated areas of the 30-km zone and towards the reorganisation of the local authorities.

Engineering countermeasures, realised mostly in the evacuation zone, included decontamination of the industrial area and the settlements, water-protection and dust suppression measures, removal of the 'red' forest and the abandoned villages. Agricultural countermeasures (liming and over-fertilising the soils, ploughing and products processing) were realised in the inhabited territory.

When evaluating the efficacy and environmental consequences of the countermeasures realised in the accident zone, some lessons may be summarised:

1. The countermeasures to be realised for an area should be consistent in their nature and goals.
2. Human-induced deterioration of the initial parameters of the radioactive contamination field, including transfer of the radionuclides from the more contaminated areas to less polluted zones; translocation of the radionuclides into more aggressive and migration-active environments; translocation of the radionuclides into the inaccessible or uncontrolled environments should not be tolerated.
3. Countermeasures which disturb the ecosystems (natural landscape) and geochemical barriers or damage their radiocapacity and ability to self-restoration are not admissible.

The massive release of the radionuclides into environment after the Chernobyl nuclear accident has created a critical radioecological situation. The large-scale character of the nuclear accident made the immediate elimination of the consequences impossible and resulted also from the character of the post-accident countermeasures. The objective situation around the nuclear power plant immediately after the accident were as follows:

- Excessive levels of radioactive contamination forced to the evacuation of the population from the 30-km zone;
- Dose rates to the population of the less contaminated territories were to be minimised;
- Dose rates to the staff involved into intense construction activity on the damaged unit and the surrounding area were also to be minimised;
- Spreading of the radionuclides outside the contaminated area, mainly by water migration, was to be avoided.

The Chernobyl nuclear accident caused a irreversible radioactive contamination of the environment on densely populated territories. It was impossible to continue life and normal agricultural activity on the territory contaminated to more than 40 Ci/km². Thus, 90 784 persons, including the 61 614 inhabitants from the two towns of Pripyat and Chernobyl and 29 170 villagers from 78 settlements, were evacuated in 1986.

The land use system of the evacuation zone was to be changed to cope with the new conditions. About 580 hectares of pine forest located just around the nuclear power plant were lost through lethal irradiation (500 mR/hour and more) during the first months after the accident. Because of the colour of the dry pine needles it assumed the name "red forest". Most of it was taken away by mechanical removal of the wood stand together with the surface layer of contaminated soil to decrease the dose rates of NPP staff. Thus the industrial area was extended after the accident.

Intensive decontamination was made, and some abandoned villages burned down by spontaneous fires, while others had been destroyed by technical means to minimise the probability of fires and the secondary resuspension of the radionuclides. Thus the area and percentage of settlements part of the evacuation zone decreased during the period 1986 to 1995 from 4,5% to 3% of the territory.

Normal agricultural activity within the evacuation zone was stopped completely. In this zone arable lands are represented only by some experimental fields. It entailed intensive development of self-restoration processes of the natural lands-

capex and ecosystems including their components, soil and vegetation, on the plots that had been cultivated before.

A number of the administrative, engineering and agricultural countermeasures, which have been realised after the Chernobyl nuclear accident were directed towards:

- minimising the irradiation of the population in the affected territories;
- reducing the dose rates for the NPP staff and workers in the exclusion zone;
- avoiding expansion of the radionuclides outside exclusion zone.

Moreover, no target priorities were defined.

The countermeasures realised after Chernobyl accident are well described, analysed and evaluated on their dosimetric and financial efficacy [1, 2, 3 *et al.*].

Administrative countermeasures were directed towards the relocation of the population from the most heavily contaminated areas of the 30-km zone and towards the reorganisation of the local authorities. As a result, new administrative units at the province level, i.e. the exclusion zone, and some new administrative districts, have been created.

Engineering countermeasures, realised mostly in the evacuation zone, included decontamination of the industrial area and the settlements, water-protection [3] and dust suppression measures, removal of the ‘red’ forest and the abandoned villages.

Table 1: Efficacy of some water -protection countermeasures [3, with modifications]

Period	Countermeasure	Averted dose before 1997	Averted dose expected after 1997	Comments
1986	Protection walls along Prypiat river	No effect	Not applicable	Staff dose rate exceeds averted dose
1986-1987	Prypiat river bed catchments	10-15 mSv	Not applicable	Filled by river sandy deposits before 1991
1987-1988	Leaking and impenetrable dams on the brooks and streams	4-5 mSv during 1986-87	Not applicable	Mostly destroyed before 1988
1993	Left-side Prypiat water-protection dam	120-150 mSv	500-600 mSv	To be exploited during 60 years
1998	Right-side Prypiat water-protection dam in construction	-	200-250 mSv	To be exploited during 60 years

Agricultural countermeasures (liming and over-fertilising the soils, sorbents, special ploughing and products processing) were realised in the inhabited territory [4], but evacuation of the 48 500 individuals from 80 settlements was continued, and large areas of the districts Polissky and Narodichi were included in the Exclusion zone. Finally 2 115 km² of agricultural lands, including 1352 km² of arable lands lost for reasons of high contamination or high transfer coefficients to agricultural products from acid peat soils.

More than 2 300 km² of Ukrainian territory with population numbering 200 000, contaminated with 5 to 15 and more Ci/km² by ¹³⁷Cs, are still inhabited and cultivated.

For the large-scale nuclear accident the impossibility of decontamination of the territory and the importance of the environmental means to control migration of the radionuclides was admitted [2].

When evaluating the system character and environmental impact of the countermeasures realised in the Chernobyl accident zone, which is of special importance for a large-scale nuclear accident, some lessons may be summarised as follows:

1 The countermeasures to be realised for an area should be consistent in their nature and goals. Some contradictory countermeasures were planned and realised by different organisations.

Among them:

- i) decontamination of the settlements and after that destruction (burial) of some of them;
- ii) creation of the water-protection dam along the Prypiat river to cut off part of its flood plain versus reconstruction of the drainage systems of the wetlands, which enhance the peaks of the floods;
- iii) removal of 'the red forest', aiming at decreasing the external irradiation of the NPP staff, with increased possibility of contamination for the ground water.

2. Human-induced deterioration of the initial parameters of the radioactive contamination field, including

- i) transfer of the radionuclides from the more contaminated areas to less polluted zones;
- ii) translocation of the radionuclides into more aggressive and migration-active environments; and
- iii) translocation of the radionuclides into inaccessible or uncontrolled environments should not be tolerated.

Among the well-known examples of violations this principle are:

- i) the choice of the places for solid radioactive wastes location at Chistogalovka, Bourakovka and Stechanka, which are less contaminated;
- ii) removal of the «red forest» together with the contaminated soil layer and burial into trenches under the ground water level with more aggressive migration conditions; raising by the dams of the ground water level in the surrounding territories;
- iii) deep ploughing, displacing the contaminated soil layer at a depth of 40-50cm, which made it non-controlled; removal and burial of contaminated settlements.

3. Countermeasures which disturb the ecosystems (natural landscape) and geochemical barriers or damage their radiocapacity and ability to self-restoration are not admissible.

The most typical countermeasure which has damaged the ecosystems and the geochemical barriers was the removal of 'the red forest' Together with the contaminated wood stand the 20-30 cm surface-layer of the soil has been removed. As the humus horizon of the soddy-podzolic sandy soil, which is typical for the region, does not exceeded 8-12 cm, the removal has destroyed both the existing *Pinetum cladinosum* and *P. dicranosum* ecosystem, the humus geochemical

barrier, and the growing conditions for the ecosystem self-restoration. The growing conditions on the open sandy area had to be reconstructed over a long time by a special bio-chemical technology.

Another example of counter measure, which precludes the ability to forest ecosystems self-restoration on former arable lands, is ploughing the firebreaks at less than 100-120 m from the forest border, which impedes the marginal effects at the forest border, and thus the forest expansion [5].

An important consideration in the environmental impact of the countermeasures for the case of the large-scale accident is determined by the dimension of the territory affected and by the ecological half-life of the radionuclides.

References

1. The radiological consequences of the Chernobyl accident. Proceedings of the first international conference". EUR 16544 EN, Minsk, 1996
2. Sobotovich E. et al. Analysis of efficiency of countermeasures on prevention of the radioactive contamination spread. In: «Chornobyl Catastrophe», V. Baryakhtar - edit. Kyiv, Editorial House «Export of Ukraine», 1997
3. Voitsekhovitch V., Panasevitch E. On dose efficacy and social-economical expediency of modern water-protection activity in the Exclusion zone of ChNPP. Bulletin of ecological stay of Exclusion zone, 12, 1998, p.3-8
4. Problems of agricultural radiology, N. Loshchilov and B. Prister - editors, issues 1-4, Kyiv, 1991-1996 (in Russian)
5. Petrov M., Davydchuk V., Kouchma M. Successional role of the mineral anti-fire stripes at the Chernobyl exclusion zone. «Problems of Chernobyl exclusion zone», 5, 1998, p.81-88

Samenvatting

Een aantal administratieve, landbouwkundige en technische tegenmaatregelen genomen na het Chernobyl ongeval beoogden :

- de bestraling van de bevolking in de besmette zones tot een minimum te beperken ;
- de stralingsdosissen van de werknemers te verminderen ;
- de verspreiding van de radionucliden in de exclusiezone te vermijden.

Tot de administratieve maatregelen horen de evacuatie van de bevolking uit de meest besmette gebieden en de reorganisatie van de lokale overheid.

De technische maatregelen, meestal in de exclusiezone genomen, omvatten de dekontaminatie van de industriegebieden en de nederzettingen, de bescherming van het water, het bestrijden van stofontwikkeling, het afvoeren van het « rood woud » en het ontmantelen van de verlaten dorpen.

Landbouwkundige maatregelen, zoals het overbemesten, kalken en onderploegen van grond en het behandelen van landbouwproducten werden genomen in de bewoonde zones.

De volgende lessen in verband met de doeltreffendheid en de gevolgen op het milieu van de maatregelen werden geleerd :

- tegenmaatregelen moeten qua doel goed op elkaar afgestemd zijn ;
- het veranderen van de initiale parameters van het besmette gebied door het menselijk ingrijpen met negatieve gevolgen (verhoogde migratie van de radionucliden naar de gebieden met een lagere contaminatie of met een grotere chemische agressiviteit of naat weinig toegankelijke gebieden) moet ten stelligste vermeden worden ;
- tegenmaatregelen dienen natuurlijke ecosystemen (natuurlijk landschap) beïnvloeden en de natuurlijke geochemische barrières vernietigen of hun radiokapaciteit verminderen en zelfrestitutie mechanismen beschadigen, zijn niet toelaatbaar.

Résumé

Les contre-mesures de nature administrative, technique et agronomique prises après l'accident de Chernobyl visaient à :

- réduire l'irradiation des populations dans la zone d'exclusion;
- réduire la dose aux travailleurs de la zone d'exclusion;
- empêcher l'expansion des radionucléides hors de la zone d'exclusion.

Les mesures *administratives* visaient à évacuer la population des zones les plus contaminées de la zone d'exclusion et à réorganiser les autorités locales.

Les mesures *techniques*, prises surtout dans les zones évacuées, comprenaient la décontamination des zones industrielles et des zones habitées, la protection de

l'eau, la diminution de la formation de poussières, l'enlèvement de la "forêt rouge" et des villages abandonnés.

Les mesures *agronomiques*, telles que le chaulage, la surfertilisation et le labourage des sols et le traitement des produits agricoles furent exécutées dans les zones habitées.

Les leçons tirées quant à l'efficacité et les conséquences des mesures sur l'environnement peuvent être résumées comme suit:

- les contre-mesures décidées pour une zone doivent procéder d'un but commun et non contradictoire;
- la détérioration des paramètres initiaux du milieu par l'intervention humaine entraînant le transfert des radionucléides des zones plus contaminées vers des zones moins contaminées, leur translocation vers des environnements plus agressifs, favorisant la migration, et la translocation vers des zones inaccessibles, est à proscrire.
- les contre-mesures qui dérangent les écosystèmes (paysages naturels) et qui endommagent les barrières géochimiques et diminuent leur radiocapacité et qui réduisent la capacité d'autorestauration, sont inadmissibles.

REFERENCES for DECISION AIDING TECHNIQUES (DAT)

- ANONYMOUS 1990 State All-Union and Republican Programme for Urgent Measures for Eliminating the Consequences of the Chernobyl Accident for 1990-1992 , Moscow
- CEC 1993 Radiation Protection Principles for Relocation and Return of People in the Event of Accidental Releases of Radioactive Materials
Radiation Protection No 64 OOEPEC, L- 2985, Luxembourg
- EC 1997 Radiation Protection Principles for Urgent Countermeasures to Protect the Public in the Event of Accidental Releases of Radioactive Material
Radiation Protection No 87 OOEPEC, L- 2985, Luxembourg
- IAEA 1991 The International Chernobyl Project: Assessment of Radiological Consequences and Evaluation of Protective Measures.
Technical Report by an International Advisory Committee, IAEA[?]
- IAEA 1994 Intervention Criteria in a Nuclear or Radiation Emergency
Safety Series N° 109 Vienna
- IAEA 1996 International Basic Safety Standards for Protection against Radiation and for the Safety of Radiation Sources Safety Series No 115 Vienna.
- ICRP 1973 Implication of Commission Recommendations that Doses be Kept as Low as Readily Achievable
ICRP Publication 22 Pergamon Press
- ICRP 1983 Cost-Benefit Analysis in the Optimisation of Radiation Protection
ICRP Publication 37 Pergamon Press
- ICRP 1989 Optimisation and Decision-Making in Radiological Protection
ICRP Publication 55 Pergamon Press
- ICRP 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection
ICRP Publication 60 Pergamon press (1991)
- ICRP 1993 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection
ICRP Publication 63 Pergamon press
- JARVIS N S 1993 Birchall A, James A C, Bailey M R, Dorian M-D, LUDEP 1. 1. Personal Computer Program for Calculating Internal Doses Using the New ICRP Respiratory Tract Model ,NRPB 264
- FAO/WHO 1989 Codex Alimentarius Commission Food Standards Programme. Proposed FAO/WHO Levels for Radionuclide Contamination of Food in International trade, CX/FAC 89/17
- FRENCH S. 1992 The Decision Conferences in the USSR. In International Chernobyl Project -Input from the CEC to the Evaluation of the Relocation Policy Adopted by the Former Soviet
Union CEC Report EUR 14543 EN
- LEFAURE C 1993 LOCHARD J, SCHNEIDER T, SCHIEBER C Proposition pour un système de valeurs de référence de l'homme-sievert
CEPN-R193
- LINGE II 1990 Dose related distribution of population from contaminated areas (5Ci km⁻² of Cs-137 and above)
Institute of Biophysics USSR Ministry of Public Health

- LOCHARD J 1992 SCHNEIDER T Countermeasures to be Taken after 1990 to Ensure Safe Living Conditions for the Population Affected by the Chernobyl Accident in the USSR: a First Evaluation of Costs and Doses Averted In International Chernobyl Project - Input from the CEC to the Evaluation of the Relocation Policy Adopted by the Former Soviet Union
CEC Report No EUR 14543 EN OOPEC L-2985 Luxembourg
- LOCHARD J BELYAEV S, Eds.1996 Decision aiding system for the management of post-accidental situations
European Commission Report No EUR 16534 EN OOPEC L-2985 Luxembourg
- STOKELL P 1991 CROFF J, LOCHARD J, LOMBARD J., ALARA: From Theory towards Practice
Commission of the European Communities Report No EUR 13796 EN OOPEC L-2985 Luxembourg

LIST of PARTICIPANTS

Antoine Philippe	SCK.CEN	Boeretang 200	2400 Mol
Arkipov Andrey	Chernobyl Centre	Shokolnaja 6,	Chernobyl 255620 Ukraine
Bettonville Véronique		Neblon le Pierreux 28	4590 Ouffet
Bleus Marc	IRE	IRE Zoning Industriel	6220 Fleurus
Bodart Franz	Fac.Univ.ND Paix	Rue de Bruxelles 61	5000 Namur
Ceulers Luc	Electrabel Tihange	Rue de l'Industrie 1	4500 Tihange
Charpin Florence	IPSN	BP 6	F-92266 Fontenay-aux-Roses
Cottens Eric	DBIS	Ravenstein 36	1000 Bruxelles
Davydchuk Vasyl	Inst.Geography-Kiev	44 Volodymyrska St.	Kyiv 252034Ukraine
Debauche Antoine	IRE	IRE Zoning Industriel	6220 Fleurus
Deboodt Pascal	SCK.CEN	Boeretang 200	2400 Mol
Degueldre Didier	AIBVinçotte Nucl.	Av. du Roi 157	1190 Bruxelles
Delcourt Frederic	AV-Contrôlatom	Av. du Roi 157	1190 Bruxelles
Delhove Jean	BVSABR	Av. Malmaison 49	1410 Waterloo
Delvigne Thierry	Canberra Packard	Pontbeeklaan 57	1731 Zellik
Deschamps J.	SGCISN-Paris		
Desmedt Michel	SPRI	Ravenstein 36	1000 Bruxelles
Dresselaers Rudi	Belgoproces	Gravenstraat 73	2480 Dessel
Englebert Bernard	Electrabel Tihange	Rue de l'Industrie 1	4500 Tihange
Foulquier Luc	IPSN/DPrE	CE-Cadarache,	13108 St-Paul-Lez-Durance
Franchois Hedwig		Dennenlaan 74	9120 Beveren
Genicot Jean-Louis	SCK.CEN	Boeretang 200	2400 Mol
Govaerts Paul	SCK.CEN	Boeretang 200	2400 Mol
Hardeman Frank	SCK.CEN	Boeretang 200	2400 Mol
Hartmann Philippe	EDF Radioprotect.	3 rue de Messine	75384 Paris Cedex 08
Hemidy Pierre-Yves	EDF/DG/SRP	3 rue de Messine	75384 Paris Cedex 08
Janssens Herwig	Hogeschool Limburg	Apollostraat 9/1	2600 Berchem
Janssens Augustin	CE		
Kirchmann René	Inst.Botanique Ulg	Inst. Botanique Bât.22	4000 Liège
Kockerols P	Belgonucleaire	Europalaan 20	2480 Dessel
Koziol Michel	IRE	IRE Zoning Industriel	6220 Fleurus
Lachaume Jean-Luc	DSIN	Rte du Panorama Schuman BP 83	F-92266 Fontenay-aux-Roses
Ladrielle Thierry	AV-Contrôlatom	Av. du Roi 157	1190 Bruxelles
Lambotte Jean-marie	SPRI	Ravenstein 36	1000 Bruxelles
Lebe Jean	Groupe Intra	BP 61	F- 37420 Avoine
Lombard Jacques	IPSN-DPHD-SFRP	BP 6	F-92265 Fontenay-aux-Roses
Loos Mark	SCK.CEN	Boeretang 200	2400 Mol
Meizig Michel	TÜV Rheinland/Berlin e.V.- TKS	Am Granenstein	D - 51105 Koln - Germany
Metivier	IPSN - Cadarache		
Mourlon	IPSN - Cadarache		
Polak Andrzej	Landré Glinderman	Antwerpsesteenweg 104	2630 Aartselaar
Pote Jeanne	BVSABR	Wilgengarde 8	1702 Groot Bijgaarden
Rombouts Jef		Turnhoutseweg 30	2340 Beerse
Rousseau Denys	IPSN	BP 6	F-92265 Fontenay-aux-Roses
Smeesters Patrick	SPRI	Ravenstein 36	1000 Bruxelles
Sohier Alain	SCK.CEN	Boeretang 200	2400 Mol
Sombre Lionel	SPRI	Ravenstein 36	1000 Bruxelles
Stiévenart Claire	BVSABR	Av. A. Huysmans 206/10	1050 Bruxelles
Thezee Christian	EDF	EDF - IGSN 32 rue de Monceau	F- 75384 Paris Cedex 8
Van Binnebeek Jean-Jacques	AVN - Bruxelles	Avenue du Roi 157	1190 Bruxelles
Van Eijkeren Marc		Boswilddreef 7	9940 Ertvelde
Vandecasteele Christian	SCK.CEN	Boeretang 200	2400 Mol
VanderStricht Etienne	BVSABR	Domaine de Brameschhof 27	L- 8290 Kehlen
Vandorpe Marc	Tecnubel	Gravenstraat 73	2480 Dessel
Vanmarcke Hans	SCK.CEN	Boeretang 200	2400 Mol
Vreys H.	DBIS	Ravenstein 36	1000 Bruxelles
Williot Christiane		Rue des Renoncules 19	1170 Bruxelles