

Comité Directeur pour la gestion de la phase post-accidentelle d'un accident nucléaire ou d'une situation radiologique (CODIR-PA)



Groupe de travail « Hypothèses »

**Données contextuelles et hypothèses pour mener les
évaluations prédictives des conséquences
radiologiques et dosimétriques en début de phase de
transition post-accidentelle**



Rapport des travaux 2007-2009

20 janvier 2010

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	3
2. EXAMEN DES VOIES D'EXPOSITION D'UNE PERSONNE PRÉSENTE SUR UN TERRITOIRE CONTAMINÉ.....	6
2.1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES VOIES D'EXPOSITION CONSIDÉRÉES	6
2.2. HYPOTHÈSES POUR LE CALCUL DES DOSES DUES À L'INGESTION DES DENRÉES ALIMENTAIRES	10
2.2.1. Les habitudes alimentaires de la population	10
2.2.2. Facteurs de l'alimentation ayant une influence sensible sur la dose	13
2.2.3. Recommandations pour l'évaluation des doses prévisionnelles dues à l'ingestion d'aliments contaminés.....	19
2.3. HYPOTHÈSES POUR LE CALCUL DES DOSES DUES À L'IRRADIATION EXTERNE	21
2.3.1. Les facteurs physiques intervenant dans le calcul de la dose due à l'irradiation externe ...	21
2.3.2. Les budgets « espace-temps » des personnes résidant dans un environnement contaminé..	24
2.3.3. Recommandations pour le calcul des doses liées à l'irradiation externe due aux dépôts radioactifs.....	27
2.4. HYPOTHÈSES POUR LE CALCUL DES DOSES DUES À L'INGESTION INVOLONTAIRE DE PARTICULES RADIOACTIVES.....	29
2.4.1. Données et modèles disponibles pour l'évaluation de la dose due à l'ingestion involontaire	29
2.4.2. Recommandations pour le calcul des doses prévisionnelles dues à l'ingestion involontaire de particules radioactives.....	31
3. ESTIMATION DE LA CONTAMINATION PRÉVISIBLE DES DENRÉES AGRICOLES	33
3.1. LES FACTEURS AYANT UNE INFLUENCE SENSIBLE SUR LA CONTAMINATION DES DENRÉES	33
3.1.1. Les bases de connaissance sur la contamination des denrées agricoles en situation accidentelle.....	33
3.1.2. Paramètres contextuels importants pour l'évaluation prédictive de la contamination des denrées agricoles	36
3.2. RECOMMANDATIONS POUR LE CALCUL PRÉDICTIF DE LA CONTAMINATION DES DENRÉES AGRICOLES AU COURS DU PREMIER MOIS SUIVANT LA FIN DE L'ACCIDENT.....	42
4. ESTIMATION PRÉDICTIVE DES DÉPÔTS RADIOACTIFS AU DÉBUT DE LA PHASE DE TRANSITION	44
4.1. LES MÉTHODES DISPONIBLES POUR L'ÉVALUATION DES DÉPÔTS	44
4.1.1. Connaissance des caractéristiques des rejets	44
4.1.2. Dispersion atmosphérique des substances radioactives et dépôts associés	45
4.2. RECOMMANDATIONS DU GROUPE DE TRAVAIL	46
5. MÉTHODE D'EXPERTISE DES CONSÉQUENCES POST-ACCIDENTELLES.....	48
5.1. PROPOSITION D'UNE MÉTHODE ITÉRATIVE D'ÉVALUATION DES DÉPÔTS RADIOACTIFS INITIAUX...	49
5.1.1. Diagnostic/pronostic du dépôt au cours de la phase d'urgence.....	49
5.1.2. Actualisation du diagnostic des dépôts après la fin des rejets	55

5.2. ÉVALUATION ITÉRATIVE DES DOSES PRÉVISIONNELLES ET DE LA CONTAMINATION DES DENRÉES AGRICOLES.....	57
5.2.1. Principales données contextuelles pour l'évaluation des dépôts initiaux et du débit de dose ambiant.....	57
5.2.2. Principales données contextuelles pour l'évaluation prédictive de la contamination des denrées agricoles et naturelles	60
5.2.3. Principales données contextuelles pour l'évaluation prédictive des doses reçues par les populations au cours du 1 ^{er} mois.....	62
5.3. CONCERTATION AVEC LES PARTIES PRENANTES POUR L'EXPERTISE DES CONSÉQUENCES POST-ACCIDENTELLES	65
6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	67
BIBLIOGRAPHIE.....	68
ANNEXE 1 - LISTE DES PARTICIPANTS AU GT « HYPOTHÈSES »	70
ANNEXE 2 - LISTE DES EXPOSÉS PRÉSENTÉS AU GT « HYPOTHÈSES »	71

1. INTRODUCTION

Dans le cadre de la directive interministérielle du 7 avril 2005 sur l'action des pouvoirs publics en cas d'événement entraînant une situation d'urgence radiologique, le Comité directeur pour la gestion de la phase post-accidentelle d'un accident nucléaire ou d'une situation d'urgence radiologique (CODIR-PA), mis en place par l'ASN, a pour objectif général d'élaborer la doctrine fondant l'organisation et l'action des pouvoirs publics en situation post-accidentelle.

Une situation post-accidentelle (appelée également « post-événementielle ») désigne une situation suspectée ou avérée de contamination radiologique de l'environnement ou de personnes à la suite d'un accident survenu dans le cadre d'une activité nucléaire ou d'un acte de malveillance. Dans une première étape, le CODIR-PA s'est donné pour mission de travailler autour de scénarios d'accident d'ampleur « moyenne » affectant un réacteur nucléaire électrogène en France, ainsi qu'un scénario générique de rejet de plutonium.

Dans le cadre de ces travaux, le comité directeur a décidé, en 2007, de mettre en place un groupe de travail dédié aux hypothèses à utiliser pour mener les évaluations des conséquences radiologiques et dosimétriques en situation post-accidentelle (GT « Hypothèses »). Au cours du premier semestre 2007, deux réunions de ce groupe de travail, présidées par l'ASN, ont été consacrées à la mise en place du groupe et à l'appropriation du sujet, notamment à l'aide des deux premiers scénarios d'accident étudiés par le CODIR-PA. Par la suite, l'ASN a proposé de confier l'animation du groupe à l'IRSN, de la manière suivante :

- pilotage du groupe : Didier Champion, IRSN ;
- secrétariat technique (préparation des ordres du jour et rédaction des comptes-rendus) : Sylvie Roussel-Debet, IRSN ;
- organisation des réunions : Florent Matouk, ASN.

Étaient régulièrement conviés aux réunions, des représentants de l'IRSN, de l'ASN, du ministère de l'agriculture (DGAL et CGAAER), du ministère de l'intérieur (DDSC), du DSND, de l'InVS, de l'AFSSA, de l'ORS-PACA, de Météo-France, des exploitants nucléaires (EDF, CEA, AREVA), du CEPN, des associations (ANCLI, ACRO, Robin des Bois). Deux organismes étrangers (OFSP en Suisse et NRPA en Norvège) étaient également tenu informés des comptes-rendus de réunion. La liste détaillée des participants aux réunions figure en annexe 1. Au total, 10 réunions se sont tenues entre le 19 mars 2007 et le 12 octobre 2009. Pour chaque réunion, des exposés techniques dont la liste figure en annexe 2 ont permis d'introduire les discussions sur les sujets examinés par le groupe. Les deux dernières réunions (juin et octobre 2009) ont été consacrées à la discussion du présent rapport qui a été soumis pour avis aux membres du CODIR-PA le 6 novembre 2009.

Compte-tenu de l'étendue du sujet et des éléments contenus dans les rapports d'étape produits par les autres groupes de travail déjà en place, le GT « Hypothèses » a centré son action sur le problème

suivant : **dans le contexte d'un accident nucléaire, quelles sont les paramètres contextuels¹ et les hypothèses à retenir pour mener les évaluations prédictives des conséquences radiologiques et dosimétriques qui permettraient aux autorités de décider des premières actions de protection au début de la phase de transition post-accidentelle ?** En effet, les premiers éléments de doctrine dégagés par les travaux du CODIR-PA conduisent à proposer des actions immédiates, si elles sont justifiées, à engager dès la sortie de la phase d'urgence selon plusieurs zones :

1. **une Zone de Protection des Populations**, à l'intérieur de laquelle des actions seraient menées dans le but de réduire les doses susceptibles d'être reçues par les personnes qui s'y trouvent, notamment :
 - l'interdiction de consommer et de commercialiser les denrées alimentaires d'origine locale, en fonction de l'estimation des doses prévisionnelles, efficace et à la thyroïde (si pertinent), susceptibles d'être reçues au cours du premier mois suivant l'accident par les populations qui continuent de résider dans la zone en supposant qu'elles consomment des denrées d'origine locale ;
 - si nécessaire, pour les territoires de cette zone ayant reçu des dépôts plus importants, l'éloignement immédiat des populations résidentes, en fonction des résultats d'estimation de la dose efficace prévisionnelle susceptible d'être reçue au cours du premier mois suivant l'accident, en considérant toutes les voies d'exposition à l'exception de celle due à l'ingestion de denrées d'origine locale ;
2. **une Zone de Surveillance renforcée des Territoires**, à l'intérieur de laquelle une surveillance spécifique des denrées agricoles et animales destinées à être commercialisées serait mise en place, afin de vérifier que les niveaux maximaux admissibles (NMA) fixés par la réglementation ne sont pas dépassés. La définition de cette zone reposerait sur une évaluation prédictive des niveaux de contamination susceptibles d'être observés dans les différentes catégories de productions agricoles et animales, permettant ainsi d'identifier les territoires où les NMA pourraient être dépassés.

Dans ce contexte, les travaux menés par le GT « Hypothèses » s'inscrivent dans le prolongement de deux des recommandations du GT3 (évaluation des conséquences radiologiques et dosimétriques) rappelées ici :

- « *il est recommandé de retenir des hypothèses raisonnablement prudentes sur les paramètres de calcul, afin de prévenir les risques de réévaluation « à la hausse » des conséquences ayant servi à la mise en place de zones de protection* » ;
- « *il convient de se mettre d'accord, en amont de toute crise nucléaire, sur les hypothèses à retenir sur les groupes de référence qui vont servir aux calculs des doses prévisionnelles. Il importe que ce choix d'hypothèses soit connu et assimilé par les parties prenantes concernées, ce qui incite à engager une concertation préalable* ».

L'expression « *hypothèses raisonnablement prudentes* » désigne ici des hypothèses conduisant à des estimations de doses sur la base desquelles des décisions d'actions suffisamment protectrices seraient

¹ Voir définition au paragraphe 2.1.

prises, sans toutefois entraîner de surévaluations excessives poussant à surdimensionner l'étendue de la zone de protection des population ou de la zone de surveillance renforcée des territoires, susceptibles d'induire un détriment injustifié à l'égard des populations et de l'économie locale.

En pratique, les exposés introductifs présentés en support aux discussions du GT « Hypothèses » se sont largement inspirés des données techniques des trois scénarios étudiés par le CODIR-PA, notamment dans le but de mieux comprendre la sensibilité de certains paramètres sur les résultats d'évaluation des conséquences radiologiques et dosimétriques.

Il convient également de préciser que le GT « Hypothèses » n'avait pas pour mandat d'approfondir la question des mesures de radioactivité, traitée dans le cadre du GT3. Toutefois, la prise en compte des résultats de mesure de radioactivité, d'une manière générale, est abordée de manière incidente, comme source de données permettant d'actualiser l'évaluation prédictive des conséquences radiologiques et des doses.

Le présent rapport a été rédigé à partir des éléments présentés et discutés au cours des réunions du groupe de travail (voir recueil des comptes-rendus disponible sur CD-ROM). Une version provisoire de ce rapport a été présentée au CODIR-PA, lors de sa réunion du 19 juin 2009, et a donné lieu à de multiples consultations au cours de l'été 2009. La présente version intègre les observations reçues et discutées lors de la dixième réunion du GT « Hypothèses » (12 octobre 2009), ainsi qu'un nouveau chapitre (chapitre 5) proposant une méthode d'expertise des conséquences post-accidentelles basée sur les éléments considérés par le GT « Hypothèses ».

2. EXAMEN DES VOIES D'EXPOSITION D'UNE PERSONNE PRÉSENTE SUR UN TERRITOIRE CONTAMINÉ

2.1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES VOIES D'EXPOSITION CONSIDÉRÉES

L'étude des voies d'exposition en contexte post-accidentel est nécessaire à l'évaluation des indicateurs dosimétriques et radiologiques aidant à définir, au début de la phase de transition, les territoires sur lesquels les populations devraient être éloignées, ceux sur lesquels la consommation de denrées alimentaires d'origine locale devrait être interdite et enfin ceux où la contamination des denrées agricoles commercialisées devrait être systématiquement surveillée.

Le schéma de la figure 1 illustre les voies d'exposition considérées et les paramètres contextuels qui interviennent dans l'évaluation des doses associées.

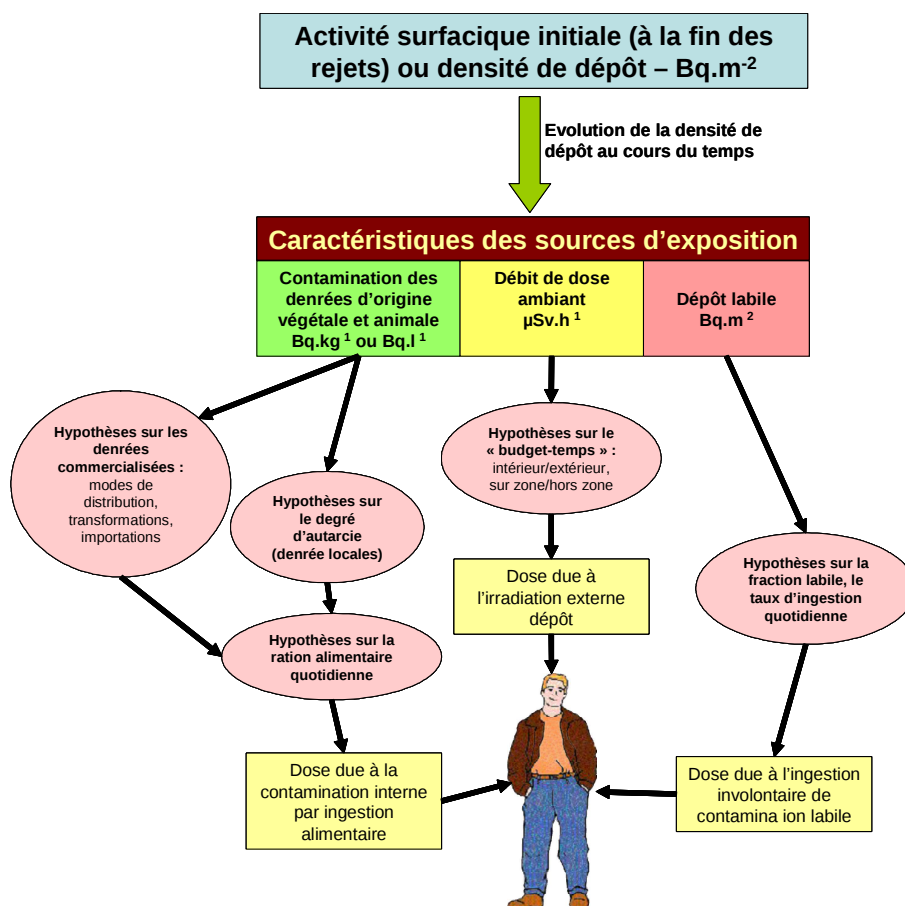


Figure 1 - Voies d'exposition considérées pour une personne se trouvant sur un territoire affecté par un dépôt radioactif après un rejet accidentel de radionucléides. Pour chacune des voies, sont identifiées les principales catégories de paramètres contextuels pour lesquelles des hypothèses sont requises, ainsi que les sources d'exposition environnementales associées. Les caractéristiques des sources d'exposition dépendent de la densité de dépôt initiale et varient dans l'espace et dans le temps. Remarque : dans certaines situations, l'exposition par inhalation de particules radioactives remises en suspension, non représentée dans ce schéma, devrait aussi être considérée (cf. § 2.4).

La figure 2 montre les contributions respectives des différentes voies d'exposition considérées dans le contexte du début de la phase de transition post-accidentelle, pour les trois scénarios étudiés par le CODIR-PA.

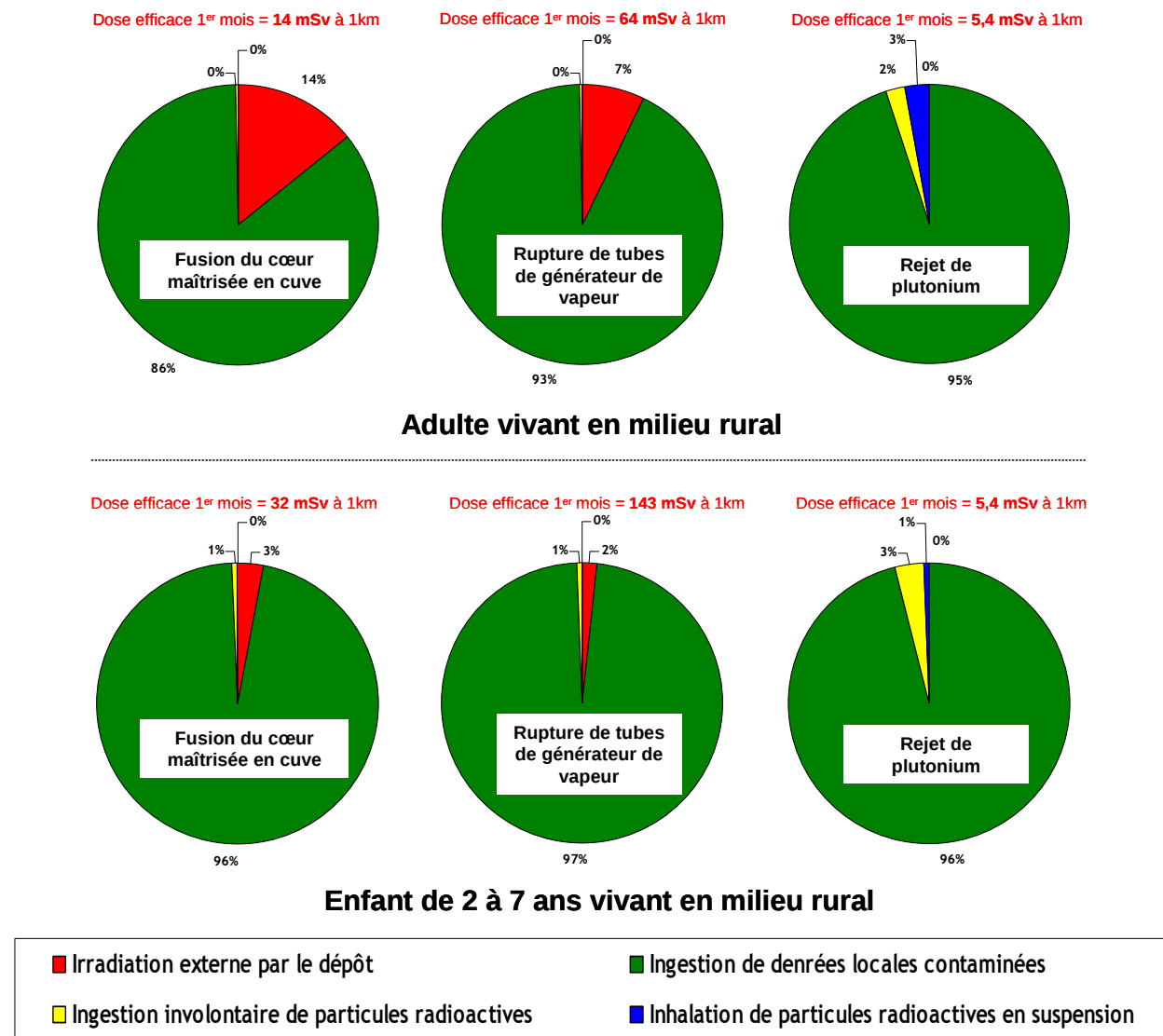


Figure 2 - Contribution des différentes voies d'exposition à la dose efficace reçue au cours du premier mois suivant la fin des rejets, par une personne (adulte ou enfant de 2 à 7 ans) vivant à 1 km du site accidenté, en l'absence d'action de protection. Les personnes considérées sont supposées vivre en milieu rural, avec une consommation partielle de denrées agricoles d'origine locale (d'après les statistiques INSEE de 1991).

Dans tous les cas, la dose due à l'ingestion de denrées d'origine locale est largement dominante, allant de 86 % à 97 % selon le scénario ou l'âge de la personne exposée. Ce constat est généralisable à la plupart des situations post-accidentelles et explique pourquoi les actions visant à réduire les doses dans la zone de protection des populations concernent principalement, en termes d'étendue de territoire, la consommation de denrées locales, au moins au cours du premier mois suivant l'accident. Dans le cas des accidents affectant un réacteur à eau pressurisée (REP), entraînant la contamination de l'environnement par des radionucléides émetteurs gamma, la dose due à l'irradiation externe par le dépôt constitue la seconde contribution à la dose efficace, quel que soit

l'âge des personnes exposées. En pratique, c'est cette voie d'exposition qui est déterminante pour la définition d'une éventuelle zone d'éloignement immédiat en début de phase de transition. Par contre, dans le cas du scénario de rejet de plutonium, la dose due à l'irradiation par le dépôt est pratiquement négligeable au regard des autres voies d'exposition ; pour ce scénario, si on exclut l'ingestion de denrées d'origine locale, ce sont l'ingestion involontaire ou l'inhalation de particules radioactives remises en suspension qui constituent les voies d'exposition dominantes, selon l'âge de la personne considérée.

En pratique, le calcul des doses susceptibles d'être reçues au cours du mois suivant l'accident implique de connaître les paramètres contextuels concernant les personnes considérées et leur environnement :

- pour l'exposition externe due au dépôt : la cartographie du débit de dose ambiant et le mode de vie des personnes (occupations au domicile, au lieu de travail, lors de loisirs, déplacements sur le territoire, etc.) qui dépend notamment de l'âge ;
- pour l'exposition par ingestion involontaire : à la fois les caractéristiques de la fraction labile du dépôt (et son évolution dans le temps) et le comportement des personnes (fréquence des contacts avec les surfaces contaminées, hygiène) ;
- pour l'exposition due à l'alimentation : outre le niveau de contamination des denrées (cf. §3), les paramètres liés aux régimes alimentaires et la provenance géographique des aliments consommés, dont la part d'origine locale et la part venant de circuits de distribution plus ou moins complexes.

Il est évidemment impossible de faire un calcul personnalisé pour chaque individu présent sur les territoires contaminés. Il s'agit donc de choisir des scénarios d'exposition pour des groupes d'individus, à la fois représentatifs de situations vraisemblables sur ces territoires et de nature à déterminer des actions de protection efficaces pour le plus grand nombre de personnes. La construction de ces scénarios conduit à fixer des valeurs aux différents paramètres intervenant dans le calcul, qui peuvent être :

- soit des valeurs connues *a priori*, avant l'accident, grâce à des études, enquêtes, recherches générales ou locales (par exemple sur les régimes alimentaires, les données agronomiques, les modèles physiques de transfert des substances radioactives) ;
- soit des valeurs acquises au moment de l'accident, grâce à des moyens d'investigation ou d'observation rapides (par exemple les conditions météorologiques, les mesures de radioactivité disponibles).

Le calcul des doses prévisionnelles pour les différents scénarios considérés se heurte aux difficultés suivantes :

- il peut exister des **lacunes de connaissance** sur les valeurs des paramètres à retenir pour le calcul, en raison de l'absence d'étude spécifique antérieure. Cela peut par exemple concerner des paramètres locaux sur la consommation de denrées sensibles à la contamination

radioactive, des paramètres concernant certains radionucléides peu étudiés ou des paramètres radioécologiques propres à certaines catégories de denrées.

- même pour les phénomènes bien étudiés et caractérisés, il peut exister une **variabilité naturelle, spatiale et temporelle, des valeurs des paramètres** caractéristiques de ces phénomènes, cette variabilité pouvant le cas échéant être décrite par des lois de distribution. C'est par exemple le cas du mode de vie des personnes, de leur âge ou de l'état des cultures sur les territoires contaminés.

Lors d'une expertise menée en situation de crise, qui doit produire des résultats dans des délais aussi courts que possible, il n'est pas envisageable de mener des études visant à combler des lacunes de connaissance, ni de faire des calculs sur des distributions de valeurs de paramètres, en l'absence de données disponibles rapidement. Il s'agit donc de faire des calculs selon une approche déterministe, en faisant des hypothèses sur les valeurs des paramètres intervenant dans le calcul. Le choix de ces hypothèses peut être fait :

- **soit sur une base réaliste**, en retenant les valeurs les plus fréquemment observées, pour obtenir ainsi une estimation représentative du cas le plus courant ;
- **soit sur une base conservative**, en retenant les valeurs les plus pénalisantes (dans une gamme vraisemblable) du point de vue de la dose obtenue. Cette approche va dans le sens de la protection du plus grand nombre de personnes, la probabilité d'observer le cas d'une personne dont la dose dépasserait la valeur estimée étant alors très faible.

En pratique, il est possible de mêler ces deux approches. Lors des premières évaluations, l'approche conservative sera privilégiée, mais au fur et à mesure de l'acquisition d'informations représentatives du contexte réel de l'accident, les évaluations devraient être menées sur une base plus réaliste (voir chapitre 5) de telle manière que les résultats ne soient pas surdimensionnés, l'enjeu étant de ne pas prendre inutilement des décisions d'actions qui pourraient avoir elles-mêmes un impact négatif. Dans les paragraphes suivants, il est présenté la sensibilité plus ou moins grande des principaux paramètres intervenant dans l'évaluation des conséquences radiologiques et dosimétriques ; **la doctrine générale qui sous-tend les recommandations du présent rapport consiste à proposer le choix de valeurs conservatives pour les paramètres les plus sensibles et des valeurs réalistes, usuellement données dans les études publiées, pour les paramètres ayant une influence secondaire.**

Lorsque les évaluations sont menées rétrospectivement (reconstitution des doses reçues par les personnes exposées), il convient de privilégier une approche réaliste. Par ailleurs, pour les évaluations effectuées sur une base conservative, il n'est pas possible de prendre simultanément des valeurs maximales pour tous les paramètres contextuels ; par exemple, si on retient une consommation individuelle de 250 g de viande par jour, on ne peut pas admettre qu'une personne consomme à la fois 250 g de bœuf et 250 g de poulet par jour.

2.2. HYPOTHÈSES POUR LE CALCUL DES DOSES DUES À L'INGESTION DES DENRÉES ALIMENTAIRES

Pour établir la zone de protection des populations, il est notamment nécessaire de calculer la dose susceptible d'être reçue au cours du premier mois suivant l'accident, tenant compte de toutes les voies d'exposition y compris l'ingestion de denrées alimentaires d'origine locale contaminées par les retombées radioactives. La valeur de la dose calculée va dépendre principalement :

- de la composition qualitative et quantitative des rations alimentaires ;
- de la part des denrées consommées ayant une provenance locale ;
- de la part de ces denrées consommées ayant une sensibilité particulière aux retombées radioactives dues à l'accident.

Pour cela, le GT « Hypothèses » s'est intéressé à deux sujets :

- la connaissance des habitudes alimentaires des français ;
- la connaissance des facteurs de l'alimentation particulièrement sensibles sur la dose.

2.2.1. LES HABITUDES ALIMENTAIRES DE LA POPULATION

2.2.1.1. Sources de connaissance

Il existe diverses enquêtes nationales relatives au comportement alimentaire des français (enquêtes INSEE 1991, INCA 1998) à l'échelle de vastes zones multi régionales (ZEAT), qui ont été exploitées et intégrées dans la base de données CIBLEX (IRSN -ADEME) servant couramment pour les calculs dosimétriques liés à l'alimentation. Par ailleurs, l'enquête INCA a été réactualisée pour couvrir une période allant jusqu'à 2007 (enquête INCA2 ; Lafay et Volatier, 2009). Ces enquêtes sont basées sur des questionnaires remis à des ménages afin qu'ils y consignent sur une durée brève (7 jours en général), les données de consommation, le nombre de convives, l'origine des aliments...

Ces sources d'information donnent des indications utiles pour une évaluation dosimétrique mais présentent des limites :

- les définitions des indicateurs calculés ou utilisés par ces enquêtes sont souvent variables. Par exemple, les unités de consommation nécessaires au calcul des rations individuelles ont une définition variable selon l'enquête ; l'autoconsommation peut être définie comme la part des produits provenant strictement du ménage — jardins, exploitation agricole, chasse ou cueillette... (INSEE) — ou ne pas être détaillée (INCA). La quantification de l'autoconsommation est difficile en général ; dans le cas de l'étude INCA2, représentative de la population métropolitaine, un plan de sondage optimisé a été conçu en collaboration avec l'INSEE ;
- la consommation des enfants est pondérée de façon variable ou non prise en compte. Dans le cas de l'étude INCA2, la consommation des enfants de 3 à 17 ans est mesurée ; pour les nourrissons et enfants en bas âge de moins de 3 ans, d'autres études représentatives existent (étude Alliance7-CHU Dijon par exemple) ;

- la discordance entre les catégories de denrées sur lesquelles portent les résultats et les catégories prises en compte dans le calcul de dose induit une difficulté majeure. En particulier, les catégories de denrées les plus sensibles à une contamination dans la phase précoce suivant le dépôt accidentel (i.e. légumes et fruits frais, laits et fromages frais) ne sont généralement pas détaillées, alors que l'évaluation de la dose par ingestion requiert de discriminer ces produits. Ainsi, l'utilisation de ces enquêtes pour les calculs de doses nécessite un fractionnement arbitraire de certaines catégories agrégées alors qu'au contraire pour d'autres catégories trop finement détaillées dans l'enquête, il est nécessaire de faire des regroupements. Dans le cas de l'enquête INCA2, des informations détaillées sur les produits consommés sont disponibles en une nomenclature fine en 1280 aliments. Il est donc possible de distinguer les différents types de lait (vache, brebis, chèvre) pour les produits laitiers, point intéressant pour la caractérisation de l'exposition aux radionucléides. Il existe aussi une distinction entre les produits frais, en conserve ou surgelés ainsi qu'entre les produits faits maison ou achetés tels quels. L'accès aux données désagrégées de l'étude est possible pour définir une grille d'exploitation la plus adaptée possible aux exploitations portant sur les radionucléides ; il s'agit donc d'une nouvelle source d'information à exploiter ;
- lorsque les enquêtes portent sur les modes d'alimentation d'une population « moyenne », il n'est pas possible d'identifier les comportements de « groupes à risque ». Des études de consommation alimentaire individuelle ont été mises en place au début des années 90 pour lever cette difficulté.

Les enquêtes locales les plus récentes autour des sites nucléaires portent sur Chinon (2008), le Tricastin (2004-2005 ; Durand et Mercat-Rommens, 2007), Marcoule (1998 ; Descamps, 2003) et Civaux (Bergeat, 1993). Elles ont pour objectifs a) de connaître la qualité et la quantité des différents aliments consommés par les habitants proches des sites nucléaires, b) de rechercher les comportements alimentaires pouvant entraîner une exposition plus importante de la population aux substances radioactives rejetées par les installations nucléaires et c) de définir de façon réaliste la ration alimentaire et les taux d'autoconsommation correspondants.

Ces enquêtes sont donc focalisées sur les familles résidant sous les vents dominants, possédant un verger ou un jardin. L'autoconsommation est étendue aux denrées achetées localement (petits producteurs, marchés locaux...). Le découpage des catégories de produits à renseigner par les familles correspond pour l'essentiel à ce qui est attendu pour les évaluations de doses (par exemple, légumes feuilles, légumes racines...) ; néanmoins des améliorations sont envisagées (fromages, pommes de terre). L'enquête autour du site du Tricastin tient compte de la saisonnalité. L'influence de la saison peut également être étudiée au travers des enquêtes pratiquées autour des sites de Chinon en été et de Civaux en hiver, ces deux sites appartenant à la même région agro-climatique.

Ces enquêtes apportent un complément aux enquêtes nationales car la représentativité des populations étudiées est différente : les enquêtes nationales visent à donner l'image de la population moyenne, les enquêtes locales sont focalisées sur les groupes les plus exposés.

La comparaison des résultats de ces enquêtes montre les éléments suivants :

- les quantités totales ingérées par adulte peuvent varier d'un facteur 2 (de 1 000 à 2 000 g/j pour les aliments solides) ; les enquêtes locales fournissent des résultats intermédiaires entre les moyennes nationales et régionales et les consommations extrêmes présentées dans la synthèse CIBLEX ;
- pour certains aliments (céréales, œufs, viandes), les quantités consommées varient très peu d'une enquête à l'autre, alors qu'elles fluctuent fortement pour d'autres aliments (fruits, légumes, lait) ; par exemple, en été, les habitants autour du site du Tricastin consomment 670 g/j de légumes-fruits et de fruits, contre 436 g/j pour ceux vivant autour du CNPE de Chinon ;
- les écarts de consommation entre l'été et l'hiver sont significatifs pour ces mêmes aliments. Ainsi, les enquêtes menées par l'IRSN autour des sites du Tricastin, de Chinon et de Civaux montrent que la consommation de légumes-fruits et de fruits est réduite de plus d'un facteur 2 entre l'été et l'hiver ;
- les pourcentages totaux d'autoconsommation sont à peu près équivalents entre les enquêtes. Néanmoins, la population représentée dans CIBLEX a une autoconsommation de toutes les catégories d'aliments, alors que celles des sites du Tricastin et de Chinon présentent une plus forte autoconsommation de légumes et de fruits, et une autoconsommation extrêmement faible pour des produits tels que les céréales (moins de 1%), le lait (moins de 5%) ou les viandes (hormis la viande de volaille).

L'examen des modalités de réalisation des enquêtes alimentaires en relation avec leurs utilisations dans les études d'impacts radioécologiques est détaillé dans un rapport de l'IRSN.

2.2.1.2. Recommandations relatives à la prise en compte des habitudes alimentaires

- 1) Dans le contexte de l'évaluation des doses dues à l'ingestion de denrées contaminées, **le GT « Hypothèses » recommande de retenir une définition élargie de l'autoconsommation, se rapprochant de l'autarcie**, en incluant :
 - la part des denrées produites ou récoltées directement par le consommateur (jardin, pêche, chasse, cueillette) ;
 - la part de denrées distribuées sur les marchés, de provenance locale (par hypothèse, de la commune considérée) : culture maraîchère, volaille, lait et fromage frais...
- 2) Le GT « Hypothèses » observe qu'il existe très peu de données spécifiques concernant l'alimentation des enfants, issues d'enquêtes locales. **Le GT recommande que soient exploitées les informations nouvellement acquises à ce sujet dans le cadre de l'enquête INCA2 et, si nécessaire, que des enquêtes spécifiques soient engagées autour des sites nucléaires.**
- 3) Le GT « Hypothèses » remarque que les enquêtes nationales sont assez bien adaptées à une étude de pollution chronique (utilisation de valeurs moyennes issues d'observation sur une période longue) mais très peu aux évaluations menées au début d'une situation post-accidentelle,

notamment en raison de la saisonnalité du marché qui est déterminée par la disponibilité des produits frais (exemple des fruits de printemps-été...). Seules les études INCA1 et INCA2, menées pendant une année complète, permettent d'observer la saisonnalité de la consommation alimentaire. **Le GT recommande qu'à l'avenir, les enquêtes alimentaires menées autour des sites nucléaires tiennent compte de l'influence des variations saisonnières sur la consommation de denrées d'origine locale.**

- 4) Les enquêtes menées sur les habitudes alimentaires donnent des résultats valables, par définition, hors contexte accidentel. Il est probable qu'à la suite d'un accident ayant entraîné la contamination d'un territoire, il y aurait une modification spontanée de ces habitudes alimentaires, indépendamment des restrictions décidées par les autorités. Il est difficile de prévoir *a priori* la nature et l'ampleur de ces modifications mais on peut supposer que celles-ci iraient dans le sens d'une réduction des doses dues à l'ingestion de denrées d'origine locale. **Dans ces conditions, pour le calcul des doses prévisionnelles liées à l'alimentation, le GT recommande de ne pas tenir compte de ces éventuelles modifications d'habitudes alimentaires et estime qu'il suffit d'utiliser les données disponibles avant l'accident.** Bien entendu, pour la reconstitution des doses reçues par les populations exposées en situation post-accidentelle, ces modifications devraient être prises en considération, dans le cadre d'enquêtes spécifiques mises en place pour le suivi sanitaire de ces populations.
- 5) **En complément des enquêtes alimentaires générales ou locales menées en amont de toutes situations accidentelles, le GT recommande également de mener des enquêtes sur les productions agricoles locales proprement dites, ainsi que sur leur filière de distribution.** En effet, ces enquêtes permettraient de disposer d'une information complémentaire, qualitative et quantitative, sur les denrées alimentaires habituellement produites et la part distribuée localement, en fonction des territoires et de la saison.
- 6) **Le GT recommande que les résultats de ces enquêtes, importants pour l'évaluation des risques sanitaires liés à l'alimentation, soient rendus publics,** afin d'en faciliter l'exploitation et l'utilisation à des fins d'expertise.

2.2.2. FACTEURS DE L'ALIMENTATION AYANT UNE INFLUENCE SENSIBLE SUR LA DOSE

2.2.2.1. État des connaissances

L'étude du scénario d'accident de fusion du cœur d'un REP maîtrisée en cuve (dit « APRP » par la suite) permet d'identifier les facteurs de l'alimentation qui sont particulièrement sensibles sur la dose due à l'ingestion, en considérant différentes hypothèses de rations alimentaires sur une durée de 1 mois puis de 1 an après la constitution des dépôts. Il est précisé que ces évaluations sont fournies en l'absence de toute action de protection, d'interdiction ou de contre mesures et que les aliments consommés qui ne sont pas d'origine locale sont supposés totalement exempts de contamination. Le degré de fraîcheur des produits consommés est un élément important : un produit est considéré comme frais lorsqu'il est consommé dans un délai inférieur à quelques jours après sa récolte. A

l'inverse, un produit n'est pas considéré comme frais lorsqu'il subit une transformation ou un mode de stockage permettant de le conserver et de le consommer plusieurs semaines ou plusieurs mois plus tard. De ce fait, les produits issus de conserves, consommés au cours du premier mois suivant l'accident, sont tous supposés avoir été récoltés avant l'accident et, à ce titre, sont exempts de contamination compte tenu de l'effet protecteur des emballages.

Pour ce scénario, une part importante (70 %) de la dose efficace engagée par ingestion alimentaire est reçue au cours du premier mois suivant l'accident ; l'iode 131 (radionucléide à vie courte) y contribue à plus de 85 %. La contribution de ce radionucléide reste relativement forte sur cette dose au cours de l'année entière suivant l'accident (figure 3).

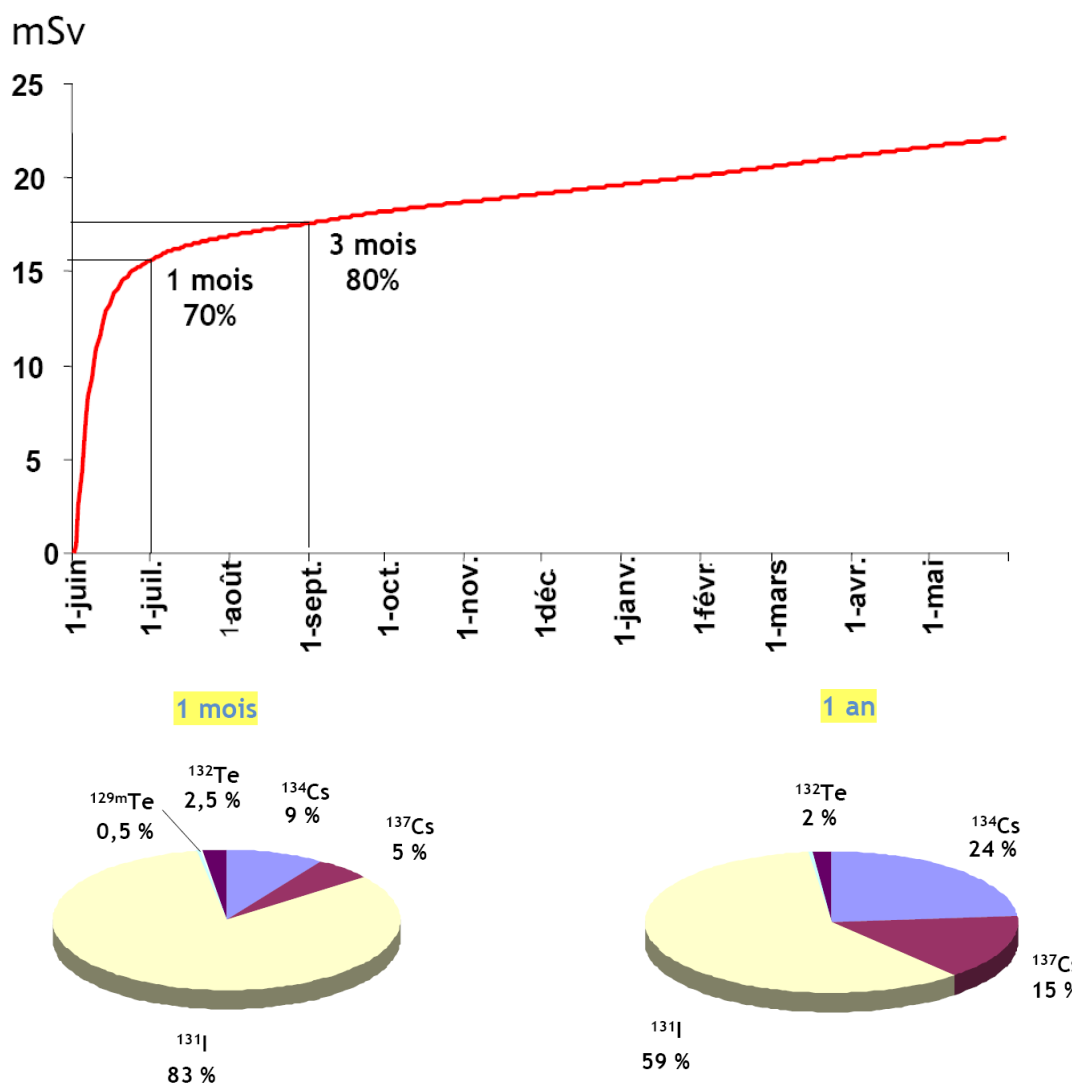


Figure 3 - En haut : évolution au cours du temps du cumul de la dose efficace engagée par ingestion alimentaire pour un adulte. En bas : contribution des radionucléides déposés à la dose due à l'ingestion de denrées contaminées, au cours du premier mois (à gauche) et de la première année (à droite) suivant la fin des rejets. Calculs réalisés avec le scénario CODIR-PA de fusion du cœur maîtrisée en cuve, pour un dépôt sec survenu le 1^{er} juin, en considérant une personne consommant des denrées produites à 1 km (sous le vent) du site nucléaire selon le régime alimentaire standard du code ASTRAL.

• **Facteurs alimentaires sensibles sur la dose « ingestion » engagée au cours du premier mois :**

En considérant le cas d'un accident survenant début juin (cas pénalisant du point de vue de la contamination des denrées agricoles), l'évaluation des doses susceptibles d'être engagées au cours du premier mois suivant l'accident en prenant différentes hypothèses de consommation ou d'autarcie permet d'analyser les facteurs sensibles de l'alimentation sur la dose (figure 4).

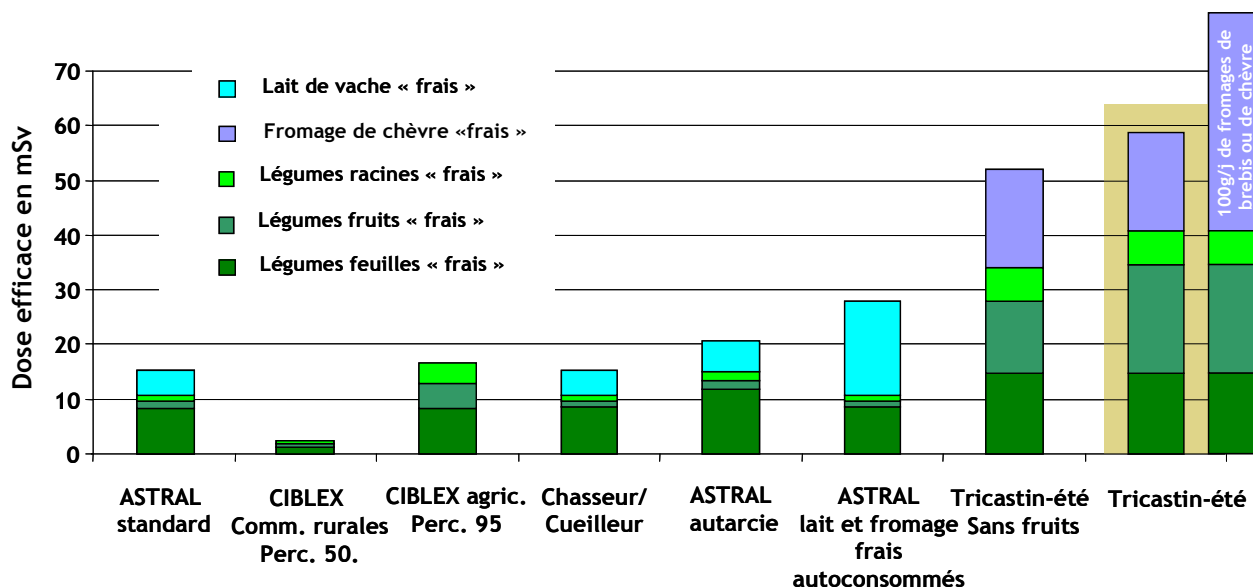


Figure 4 - Doses engagées par ingestion alimentaire au cours du premier mois, en fonction des différentes hypothèses de consommation et d'autarcie (commentées dans le texte). Calculs réalisés pour un adulte, avec le scénario CODIR-PA de fusion du cœur maîtrisée en cuve, pour un dépôt sec survenu le 1^{er} juin, en considérant une personne consommant des denrées produites à 1 km (sous le vent) du site nucléaire.

La ration standard telle que retenue dans le code ASTRAL (modèle numérique de l'IRSN pour le calcul des conséquences post-accidentelles ; Calmon et Murlon, 2006) résulte d'une adaptation des résultats d'une enquête alimentaire de l'INSEE (Bertrand, 1991) comprenant la consommation quotidienne de 87 g de légumes-feuilles dont 40 % d'origine locale, de 53 g de légumes-fruits dont 67 % d'origine locale, de 43 g de légumes-racines dont 72 % d'origine locale et de 94 g de lait frais dont 80 % d'origine locale. La consommation de fruits n'est pas prise en compte dans cette ration (non modélisée par ASTRAL) ; celle du lait UHT (180 g/j dont 8% d'origine locale), de viande et de produits céréaliers a un effet négligeable sur la dose engagée au cours du premier mois, en raison des délais de production et de consommation de ces denrées.

Les rations alimentaires issues de l'étude CIBLEX résultent de l'enquête INCA de 1998 pour ce qui concerne les quantités ingérées, les taux d'autoconsommation provenant de l'enquête INSEE de 1991. Dans le cas du percentile 95 pour un agriculteur, le régime alimentaire comprend la consommation quotidienne de 98 g de légumes-feuilles dont 62 % d'origine locale, de 47 g de légumes-fruits dont 30 % d'origine locale, de 191 g de légumes-racines dont 58 % d'origine locale et pas de lait frais. Comme précédemment, la consommation de fruits n'est pas prise en compte et celle du lait UHT, de viande et de produits céréaliers a un effet négligeable sur la dose engagée au cours du premier mois. La dose estimée pour ce régime est proche de celle estimée précédemment.

Le régime « chasseur/cueilleur » est dérivé du régime standard ASTRAL en remplaçant entièrement l'alimentation carnée par de la viande de sanglier (200 g/j) d'origine locale et en tenant compte d'une consommation quotidienne de 60 g/j de champignons et de 60 g/j de baies d'origine locale (Calmon, 1999 ; Markkula et Rantavaara, 1997 ; Svadlenkova et al., 1996). Les calculs effectués montrent que cette alimentation spécifique, avec des produits forestiers, n'a aucune influence sensible sur la dose au cours du premier mois, en raison des délais de transferts des radionucléides aux champignons et du délai de consommation de la viande de gibiers.

Le régime « ASTRAL Autarcie » est dérivé du régime standard ASTRAL en considérant un taux d'autarcie de 100 % pour les légumes-feuilles, les légumes-fruits, les légumes-racines et le lait frais. L'augmentation de la dose est relativement faible, ce qui est assez cohérent avec le fait que les taux d'autarcie du régime standard étaient déjà relativement importants.

Dans le cas du régime « ASTRAL Lait et fromage frais autoconsommés », il est considéré une alimentation lactée uniquement composée de produits frais d'origine locale. Il en résulte évidemment une dose plus importante et une contribution dominante de la consommation de produits lactés.

Le régime « Tricastin été sans fruits » tient compte des résultats spécifiques de l'enquête alimentaire menée par l'IRSN autour du site du Tricastin (été 2004), parmi les habitants qui sont des consommateurs réguliers de denrées alimentaires produites localement : 123 g/j de légumes-feuilles dont 89 % d'origine locale, de 423 g/j de légumes-fruits dont 94 % d'origine locale et de 65 g/j de légumes-racines dont 84 % d'origine locale, auxquels s'ajoutent (par hypothèse) 105 g/j de pommes de terre primeurs d'origine locale. Il est également fait l'hypothèse d'une consommation de 48 g/j de fromage de chèvre frais d'origine locale. Ces données et hypothèses portent sur des facteurs sensibles sur la dose due à l'ingestion alimentaire, conduisant à une estimation de dose plus de 3 fois plus importante qu'avec le régime standard ASTRAL.

La prise en compte de la consommation de fruits (247 g/j dont 80 % d'origine locale) en les assimilant à des légumes-fruits (en l'absence d'un modèle radioécologique spécifique) conduit à une dose encore plus élevée. Enfin, le cas théorique extrême d'une personne ayant un régime « Tricastin été avec fruits » et consommant chaque jour du fromage de brebis frais (100 g/j) fournit certainement la valeur maximale de la dose susceptible d'être reçue par ingestion alimentaire, environ 5 fois plus élevée que celle estimée avec le régime standard ASTRAL.

Ces différents cas étudiés montrent qu'au cours du premier mois suivant l'accident, l'essentiel de la dose par ingestion provient des légumes frais (légumes-feuilles en particulier). Les régimes comportant une ingestion importante de lait frais (vache), de fromage frais (chèvre ou brebis), de fruits frais aboutissent à une augmentation notable de la dose. Toutefois, pour ces deux dernières catégories de denrées alimentaires, l'état limité des connaissances sur les modèles et facteurs de transfert de la contamination radioactive conduit à les traiter de façon sommaire : les fruits d'arbres sont assimilés à légumes-fruits par manque de modèles spécifiques et la modélisation de la contamination des fromages est réduite à celle des fromages à pâte fermentée. L'influence des dérivés laitiers à consommation différée (conserves, UHT, fromages à pâte cuite ou fermentée, beurre, surgelés...) et des autres denrées est négligeable le premier mois.

• **Facteurs alimentaires sensibles sur la dose « ingestion » engagée au cours de la première année :**

En complément des évaluations précédentes, la figure 5 montre la contribution des différents types d'aliments à la dose engagée par ingestion au cours de la première année suivant l'accident, selon les différentes hypothèses sur les régimes alimentaires.

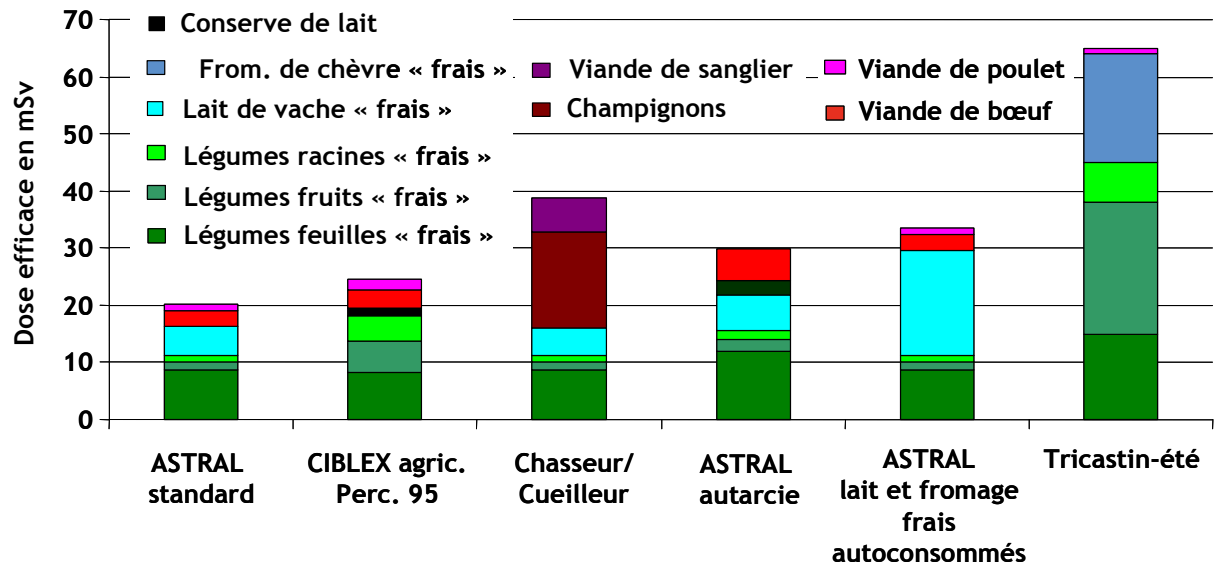


Figure 5 - Doses engagées par ingestion alimentaire au cours de la première année, en fonction des différentes hypothèses de consommation et d'autarcie (commentées dans le texte). Calculs réalisés pour un adulte, avec le scénario CODIR-PA de fusion du cœur maîtrisée en cuve, pour un dépôt sec survenu le 1^{er} juin, en considérant une personne consommant des denrées produites à 1 km (sous le vent) du site nucléaire.

Par rapport à ce qui est observé le premier mois, on voit apparaître, dans des proportions variables, une contribution à la dose due à la consommation de viande, de lait UHT et, le cas échéant, de champignons. Toutefois, mis à part le cas du régime « chasseur/cueilleur », cette contribution additionnelle est relativement faible et vient surtout de la viande de bœuf. Ce constat ne remet pas en cause les conclusions tirées de l'observation du premier mois, concernant la contribution prépondérante des légumes frais et des produits laitiers frais. Il est à noter également que la contribution des produits céréaliers à la dose est négligeable. En effet, les facteurs de transfert aux céréales sont de l'ordre d'un facteur 5 à 10 plus faibles que ceux des légumes feuilles ; de plus, les facteurs de transformation des grains en produits de meunerie (farines, riz blanc...) varient de 0,3 à 0,6 Bq/kg de céréale raffinée par Bq/kg de grain récolté, selon le taux de blutage ; enfin la durée de stockage des céréales fait que les radionucléides à vie courte, tels que l'iode 131, disparaissent par décroissance.

- **Influence de la date de l'accident sur la dose « ingestion » engagée :**

Les mêmes évaluations de doses faites en considérant que l'accident se produit le 1^{er} janvier au lieu du 1^{er} juin donnent des résultats significativement plus faibles :

- au cours du premier mois, les doses pour le régime standard ASTRAL ou le régime CIBLEX sont environ 2 fois plus faibles qu'en été, et jusqu'à 3,5 fois plus faibles dans le cas du régime « Tricastin ». La ration alimentaire des régimes CIBLEX et ASTRAL ne tenant pas compte de la saisonnalité, la diminution d'un facteur 2 de la dose due à l'ingestion alimentaire s'explique uniquement par une moindre contamination des denrées produites localement (légumes produits sous serres, stabulation des animaux nourris avec des fourrages récoltés avant les dépôts et donc non contaminés). Dans le cas du régime « Tricastin », outre cette diminution des doses liée à une moindre contamination des denrées, il s'ajoute une consommation plus faible en hiver de certaines denrées sensibles, notamment les légumes et les fruits ;
- au-delà du premier mois, les doses n'évoluent pratiquement plus, en particulier parce qu'au moment de la mise en pâture du bétail et des récoltes de culture de plein champ, la contamination des produits est très faible. Ainsi, la contribution du lait ou de la viande est négligeable. Par contre, les produits forestiers (gibiers, champignons) sont significativement contaminés et peuvent contribuer majoritairement à la dose dans le cas du régime « chasseur/cueilleur ».

Pour d'autres scénarios affectant un réacteur nucléaire (RTGV ou accident grave de fusion du cœur notamment), il est probable que l'essentiel des observations serait similaire, dans la mesure où les iodes et césiums sont les radionucléides qui contribuent majoritairement aux doses par ingestion et que les laits et fromages frais (contaminés principalement par les iodes) et les légumes frais (contaminés principalement par les iodes et les césiums) y sont particulièrement sensibles. D'une manière plus générale, les produits les plus sensibles en termes de dose engagée par ingestion sont ceux qui ont été les plus directement affectés par les dépôts, c'est-à-dire les denrées végétales. Dans le cas où seuls des radionucléides à vie longue sont rejetés par l'accident (ex. scénario « plutonium »), le fait que ces produits soient consommés à l'état frais ou après une certaine durée de conservation n'a pas d'importance du point de vue des doses reçues.

2.2.2.2. Recommandations relatives à la prise en compte des denrées alimentaires sensibles à la contamination

- 1) Pour l'évaluation des doses prévisionnelles dues à l'ingestion alimentaire, **une attention particulière doit être apportée à la part que représente la consommation de produits frais (légumes à feuilles et produits laitiers) dans le régime alimentaire**, surtout pour l'estimation de la dose engagée au cours du premier mois suivant la fin de l'accident (définition de la zone de protection des populations). En effet, au cours de cette période, la contribution des autres denrées (viandes, lait en conserve, fromages fermentés, produits céréaliers, gibier...) est faible ;

- 2) La contribution des produits frais à la dose étant très dépendante de la saison, **le GT « Hypothèses » recommande que les estimations de dose tiennent compte de la date de l'accident** afin d'intégrer les variations saisonnières de production et de consommation de ces denrées.
- 3) **Le GT « Hypothèses » recommande que les enquêtes alimentaires s'intéressent davantage à la consommation des légumes à feuilles et des produits laitiers frais en raison de leur sensibilité immédiate à une contamination par une pollution atmosphérique, en tenant compte des variations saisonnières.** En effet, les enquêtes actuellement disponibles sont très peu informatives sur ce sujet.

2.2.3. RECOMMANDATIONS POUR L'ÉVALUATION DES DOSES PRÉVISIONNELLES DUES À L'INGESTION D'ALIMENTS CONTAMINÉS

La connaissance effective de la part des denrées d'origine locale entrant dans le régime alimentaire des populations résidant autour des sites nucléaires est aujourd'hui lacunaire, surtout si on s'intéresse aux facteurs saisonniers et aux denrées sensibles à la contamination radioactive. Dans l'état actuel des connaissances, l'IRSN serait conduit, lors de ses expertises de crise, à utiliser des données d'autarcie issues de l'étude CIBLEX dont les sources sont parfois anciennes. Ainsi, dans le régime « ASTRAL Standard », il est considéré, pour une personne ayant une activité agricole en zone rurale, un régime autarcique relativement important (environ 70% pour les légumes à feuilles et 75% pour le lait frais). Le ministère de l'agriculture considère ces taux d'autarcie trop élevés, non représentatifs de ce qui serait observé aujourd'hui en milieu rural, et propose que des enquêtes alimentaires spécifiques soient réalisées dans le cadre des futurs plans locaux de gestion post-accidentelle. De son côté, l'IRSN constate, au travers des études particulières menées récemment sur l'alimentation autour de certains sites nucléaires (Tricastin, Chinon), que des taux d'autoconsommation relativement élevés peuvent être observés pour des personnes ayant des jardins ou des vergers. Dans la mesure où la zone de protection des populations qui serait mise en place au début de la phase post-accidentelle doit apporter une réponse suffisamment protectrice compte tenu de la diversité des régimes alimentaires sur un territoire donné, il paraît normal de considérer les groupes de personnes ayant un taux d'autoconsommation plus élevé que la moyenne de la population, dès lors que ces groupes existent et sont significatifs sur ce territoire. En revanche, il ne paraît pas réaliste de considérer, pour l'évaluation prédictive des doses dues à l'ingestion alimentaire servant à définir la zone de protection des populations, une hypothèse d'autarcie totale, ni des régimes alimentaires particuliers composés exclusivement de produits locaux les plus sensibles à la contamination.

Ainsi, pour l'évaluation des doses prévisionnelles dues à l'ingestion d'aliments contaminés, effectuée en début de phase de transition post-accidentelle, le GT « Hypothèses » émet les recommandations suivantes.

- 1) Pour la définition de la zone de protection des populations mise en place en début de phase de transition, **il est recommandé d'évaluer les doses en utilisant les résultats d'enquêtes alimentaires locales, qui pourraient notamment être menées dans le cadre des futurs plans locaux de gestion post-accidentelle.** Dans le cas où de telles données n'existent pas au

moment de l'accident, l'évaluation des doses devrait se faire à partir de résultats d'enquêtes nationales, parfois anciennes, qui pourraient conduire, selon le ministère de l'agriculture, à surestimer inutilement les doses en considérant une autarcie excessive.

- 2) **Les évaluations utilisant ces données doivent s'appliquer à une catégorie de personnes représentative de la population considérée comme la plus sensible à l'exposition par ingestion de denrées d'origine locale.** Le plus souvent, il s'agit des enfants de 2 à 7 ans dont les parents appartiennent à la catégorie socioprofessionnelle « rurale ».
- 3) Dans la mesure du possible, **en complément des évaluations évoquées au point précédent, il est souhaitable d'évaluer les doses pour des personnes non représentatives de la population générale mais dont le mode d'alimentation serait particulièrement sensible à la contamination alimentaire** au cours du premier mois (végétarien, consommateur régulier de produits laitiers frais, alimentation en autarcie totale...), selon une approche centrée sur les produits les plus sensibles aux retombées radioactives. En fonction des résultats obtenus, des recommandations relatives à l'interdiction ou à la modération de la consommation des denrées présumées les plus contaminées seraient à faire à l'intention des personnes vivant en périphérie extérieure à la zone de protection des populations. Ces recommandations ciblées devraient être faites avec le souci de ne pas provoquer des carences nutritionnelles chez les personnes à qui elles seraient destinées (par exemple du fait d'une restriction abusive ou trop prolongée d'aliments frais).
- 4) **Lorsque les doses les plus élevées dues à l'ingestion de denrées d'origine locale concernent les nourrissons (enfants de 0-1 ans), comme c'est par exemple le cas pour le scénario « plutonium », il pourrait être envisagé de ne pas retenir ce groupe de population pour définir la zone de protection des populations** et de le considérer uniquement comme un groupe particulier devant bénéficier de restrictions spécifiques (ne pas consommer de produits frais d'origine locale), tel que mentionné dans la recommandation précédente.
- 5) **Le GT « Hypothèses » recommande de prendre en considération spécifiquement la dose équivalente à la thyroïde** pour orienter les actions de protection alimentaire au cours des premières semaines après le dépôt, pour un rejet dans lequel les iodes sont majoritaires (accident affectant un réacteur nucléaire). Pour le calcul de cette dose, il convient de tenir compte de toutes les voies d'exposition (interne/externe) et de l'ensemble des radionucléides. La dose efficace reste un critère nécessaire lorsque d'autres radionucléides sont présents en proportions plus importantes (radio-césiums) et aussi pour la détermination du risque sur une durée beaucoup plus longue.

Remarque :

En situation post-accidentelle, il serait également nécessaire de procéder à des reconstitutions de dose *a posteriori*, afin notamment d'organiser le suivi sanitaire des personnes les plus exposées aux retombées radioactives de l'accident. Dans un tel contexte, concernant les doses dues à l'ingestion de denrées contaminées, des enquêtes spécifiques sur les modes d'alimentation (le cas échéant modifiés par rapport à ce qui prévalait avant l'accident) et ciblées sur les produits sensibles seraient alors

particulièrement utiles, en particulier pour connaître précisément les circuits et les flux de marchandises réels en situation post-accidentelle. La question d'établir *a priori* une stratégie prévoyant le schéma qui pourrait être alors mis en œuvre reste posée.

2.3. HYPOTHÈSES POUR LE CALCUL DES DOSES DUES À L'IRRADIATION EXTERNE

En début de phase de transition post-accidentelle, il apparaît difficile de disposer d'une cartographie des débits de dose établie à partir de mesures directes sur le terrain, faute de résultats suffisamment nombreux et représentatifs. Il serait donc nécessaire de réaliser une estimation prédictive du débit de dose, notamment dans les milieux bâtis, à partir de la modélisation de l'activité surfacique des dépôts formés à l'issue de l'accident. Dans ce contexte, les hypothèses utilisées pour l'évaluation prédictive de la dose reçue par irradiation externe concernent deux aspects : d'une part, ceux qui sont liés aux modes de calcul physique des débits de dose, d'autre part, ceux plus spécifiquement liés au comportement des individus (budgets espace-temps).

2.3.1. LES FACTEURS PHYSIQUES INTERVENANT DANS LE CALCUL DE LA DOSE DUE À L'IRRADIATION EXTERNE

Quatre facteurs ont une influence directe sur la dose due à l'irradiation externe :

- la densité de dépôt des radionucléides émetteurs gamma, qui évolue en fonction du temps ;
- le coefficient de dose par irradiation externe, qui dépend de la distribution des substances radioactives autour de la personne exposée ;
- le facteur de position, tenant compte de la protection apportée par les murs des bâtiments ou au contraire de sources additionnelles d'exposition liées à un environnement complexe ;
- le budget espace-temps de la personne (voir plus spécifiquement le § 2.3.2).

L'activité surfacique initiale déposée est elle-même estimée par modélisation (voir chapitre 4), en fonction des conditions de dispersion atmosphérique, des pluies éventuelles et des propriétés des radionucléides rejetés. Actuellement, cette modélisation ne permet pas de représenter les disparités de dépôt en milieu bâti, tenant compte de la forme des bâtiments et de leur état de surface (matériaux) ; seul un dépôt moyen, équivalent à ce qu'on pourrait observer sur un terrain plat, est donc considéré. L'évolution du dépôt initial au cours du temps a une influence directe sur l'irradiation externe des personnes :

- la décroissance radioactive des radionucléides à vie courte (période inférieure à 10 jours) a un effet sensible au cours des premières semaines et est facilement prise en compte dans la modélisation ;
- la migration progressive des radionucléides en profondeur peut se produire pour les dépôts sur sol meuble et ainsi atténuer l'irradiation externe. Ce phénomène est négligeable pour les radionucléides à vie courte et, en pratique, n'est à considérer que pour les radionucléides à vie suffisamment longue, comme le césium 137 qui migre à une vitesse d'environ 5 mm/an ;

- le labour des champs cultivés, qui transporte les radionucléides déposés en profondeur et les dilue dans la masse de la terre, atténuant ainsi l'irradiation externe.

En milieu forestier, le dépôt a une distribution complexe entre la canopée, la strate arbustive et le sol, et subit des transformations multiples lors de la chute des feuilles et par migration dans les végétaux, rendant la modélisation du débit de dose plus complexe (modèle RODOS, 1999).

Les coefficients de doses permettent de calculer la dose efficace par irradiation externe à partir de l'activité surfacique déposée. Ces facteurs sont fournis, par exemple, par le *Federal Guidance 12* (Eckerman et Ryman, 1993), repris dans la base ECRIN de l'IRSN (Perrin, 2003). Ils ont des valeurs différentes selon qu'il s'agit d'un dépôt surfacique ou homogénéisé sur diverses épaisseurs de sol et ils sont relatifs à l'adulte. A titre d'illustration, un dépôt de 1 MBq/m² de césium 137 entraîne un débit de dose (pour un adulte) de 2 µSv/h si le dépôt est en surface, et de 0,4 µSv/h si le dépôt est homogénéisé sur une épaisseur de 15 cm. Le *Federal Guidance 12* ne fournit pas de facteurs de dose spécifiques pour les enfants ; toutefois, de tels facteurs sont données par la GSF (Jacob et al., 1990) et repris dans la base de données ECRIN. En milieu forestier, les facteurs de doses (par radionucléide) sont corrigés en fonction de la hauteur pour tenir compte du dépôt sur la canopée.

Le calcul de la dose due à l'irradiation externe fait également intervenir un « facteur de position » qui prend en compte la position de la personne exposée par rapport aux sources d'irradiation :

- le facteur de position vaut 1 pour une personne placée à l'extérieur, sur un terrain plat et nu (figure 6) ;

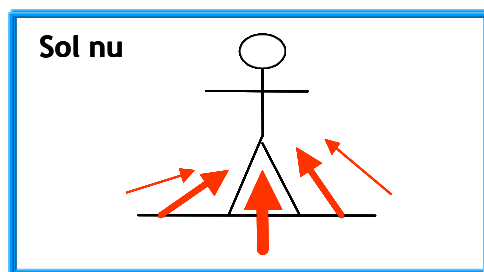


Figure 6 - Facteur de position égal à 1 pour une personne exposée par irradiation externe à un dépôt sur un terrain plat et nu. La taille des flèches est représentative de l'importance de l'irradiation, elle-même dépendant de la distance du corps à la surface (effet de géométrie).

- le facteur de position (appelé dans ce cas « facteur de protection ») est inférieur à 1 lorsque la personne est protégée du champ d'irradiation externe du fait de sa position dans un bâtiment ; le facteur de protection est d'autant plus petit que la protection apportée par le bâtiment est grande (grâce à l'atténuation du rayonnement par les matériaux et à la position de la personne dans le bâtiment ; cf. figure 7). Il existe peu de données scientifiques publiées sur les facteurs de protection associés aux bâtiments ; les valeurs fournies varient de 0,01 à 0,2 en fonction des matériaux de construction, de l'étage ou de la proximité de la toiture. Le code ASTRAL de l'IRSN utilise la valeur par défaut de 0,1 ;

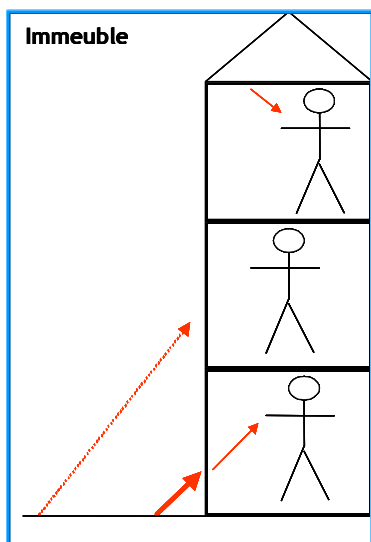


Figure 7 - Facteur de position (ou de protection dans le cas présent) inférieur à 1 pour une personne située dans un bâtiment. La taille des flèches est représentative de l'importance de l'irradiation, elle-même dépendant de l'étage (diminution avec la hauteur), des matériaux de construction (atténuation) et de la proximité du toit contaminé par un dépôt surfacique.

- le facteur de position peut être supérieur à 1 lorsque la personne est dans un environnement complexe, comportant des sources multiples au sol ou en hauteur. Il peut s'agir par exemple d'arbres (figure 8) ou des parois verticales des bâtiments ayant capté une partie du dépôt radioactif ; dans ce dernier cas, les vitesses de dépôt sont contrôlées par des phénomènes complexes, tels que l'état de surface des matériaux de construction et la température ; l'accroissement de la dose par irradiation externe qui peut en résulter pourrait être de l'ordre de 10% par rapport à la dose estimée pour un terrain nu. Les codes de calculs actuels de l'IRSN ne prennent pas en compte ce type d'exposition.

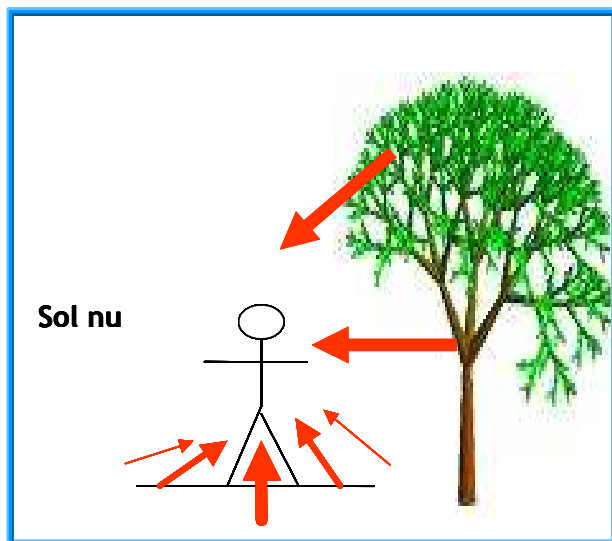


Figure 8 - Facteur de position supérieur à 1 pour une personne située à proximité d'un arbre ayant reçu un dépôt radioactif. La taille des flèches est représentative de l'importance de l'irradiation ; outre l'irradiation venant du sol, analogue à celle décrite à la figure 6, une irradiation supplémentaire est provoquée par le tronc et le feuillage de l'arbre contaminé.

La combinaison de ces différents facteurs rend difficile la modélisation prédictive du champ de rayonnement ambiant en milieu urbain qui est constitué d'un ensemble hétéroclite et complexe de bâtiments aux caractéristiques variées, de voies de circulation et d'espaces verts. L'espace urbain de référence considéré dans les outils de modélisation est généralement décrit selon 4 types de constructions comportant divers matériaux et présentant des géométries différentes : maison en préfabriqué, pavillon, rangée de maisons attenantes et pâté de maisons. L'évaluation prédictive du dépôt initial et de son évolution sur chacune des composantes, dites *surfaces urbaines*, peut être

réalisée par différentes méthodes. La modulation du dépôt initial selon le type de surface urbaine est estimée en multipliant le dépôt initial sur une surface de référence (voirie ou gazon) par un coefficient. Déterminés expérimentalement suite à l'accident de Tchernobyl, ces coefficients sont toujours inférieurs à 1, excepté pour les arbres, et décroissent au fil du temps. Ainsi, 1 semaine après un dépôt sec, le dépôt résiduel sur un toit serait de 0,3 fois celui du gazon, alors que le dépôt sur un arbre serait 10 fois supérieur. Au bout d'un an, ces valeurs seraient respectivement de 0,15 (toit) et de 2 (arbres). Ces coefficients dépendent également du type de dépôt, sec ou par temps de pluie. Pour un dépôt associé à une forte pluie, ils sont en général plus faibles que dans le cas d'un dépôt sec. Une des limites de cette approche est la prise en compte d'un dépôt homogène sur chaque type de surface, ce qui n'est pas représentatif de la réalité du milieu urbain.

Dans le contexte de l'évaluation prédictive des doses par irradiation externe reçues au cours du mois à venir, réalisée au début de la phase de transition post-accidentelle, il paraît difficile de tenir compte de la configuration réelle du milieu bâti ou des caractéristiques de protection des différents matériaux de construction utilisés. Par conséquent, un paramétrage simplifié et conservatif des outils de modélisation semble approprié pour fournir une estimation de l'ordre de grandeur de la dose due à l'irradiation externe. Par la suite, une évaluation plus réaliste de ces doses pourra être entreprise grâce aux données d'observation et aux résultats de mesure obtenus sur le terrain.

Les études menées par l'IRSN sur la modélisation du milieu urbain conduisent à proposer la définition d'environnements urbains de référence adaptés aux conditions locales observées autour des sites nucléaires. Une attention particulière doit être apportée aux alignements d'arbres le long des rues (et face aux habitations), qui peuvent être à l'origine de surexpositions des habitants ; ce type de situation ainsi que l'exposition due à la contamination des parois verticales des bâtiments ne sont actuellement pas pris en compte dans les outils opérationnels de modélisation de l'IRSN (code ASTRAL), ce qui peut conduire à sous-estimer les doses en milieu urbain.

De même, l'étude des propriétés de protection des matériaux de construction montre que les matériaux modernes, plus favorables à l'isolation thermique et par conséquent moins denses, ont tendance à apporter une protection plus faible vis-à-vis des sources extérieures d'irradiation. Par conséquent, le facteur de protection de 0,1 actuellement utilisé par le code ASTRAL et adapté à des constructions traditionnelles en parpaings de béton, est vraisemblablement trop bas et peut conduire à sous-estimer les doses pour les constructions récentes.

2.3.2. LES BUDGETS « ESPACE-TEMPS » DES PERSONNES RÉSIDANT DANS UN ENVIRONNEMENT CONTAMINÉ

Vis-à-vis de l'irradiation externe due au dépôt, la dose reçue par une personne présente sur un territoire contaminé dépend de son mode de vie (ou « budget espace-temps »), en particulier la proportion du temps passé à l'intérieur d'un bâtiment en matériaux durs (facteur de position < 1) et celle, complémentaire, du temps passé à l'extérieur, dans différents types d'environnement pour lesquels le facteur de position est égal ou supérieur à 1 : urbain, rural (agriculture) ou forestier. En principe, il conviendrait également de considérer la part du temps passé à l'extérieur des territoires contaminés (ou sur un territoire moins contaminé) du fait du déplacement de la personne ; toutefois,

dans le contexte spécifique de l'évaluation des doses prévisionnelles nécessaires à la définition de la zone d'éloignement immédiat en début de phase de transition post-accidentelle, le calcul devrait considérer le cas d'une personne restant en permanence sur le lieu considéré, à l'intérieur ou à l'extérieur de bâtiments. Ce choix n'est en revanche pas valide dans le cadre d'une reconstitution de dose, qui devrait tenir compte du mouvement réel des personnes.

Pour les deux scénarios d'accident de réacteur considérés par le CODIR-PA (RTGV et fusion du cœur maîtrisé en cuve), il y a peu de différence entre les divers cas de situation extérieure, pour ce qui concerne la dose reçue au bout du premier mois suivant l'accident. C'est donc la proportion du temps passé à l'intérieur d'un bâtiment qui est le principal facteur influençant les doses. Pour illustrer ce point, le GT « Hypothèses » a étudié la variation de la dose reçue par irradiation externe au bout d'un mois, pour le cas d'un « habitant casanier » (moins de 2 heures par jour à l'extérieur), d'un « travailleur en extérieur » (environ 10 heures par jour à l'extérieur) et pour le cas théorique d'une personne qui resterait en permanence à l'extérieur pendant un mois. La figure 9 montre les résultats obtenus, en considérant des facteurs de protection des bâtiments variant entre 0,01 (forte protection) et 0,2 (faible protection).

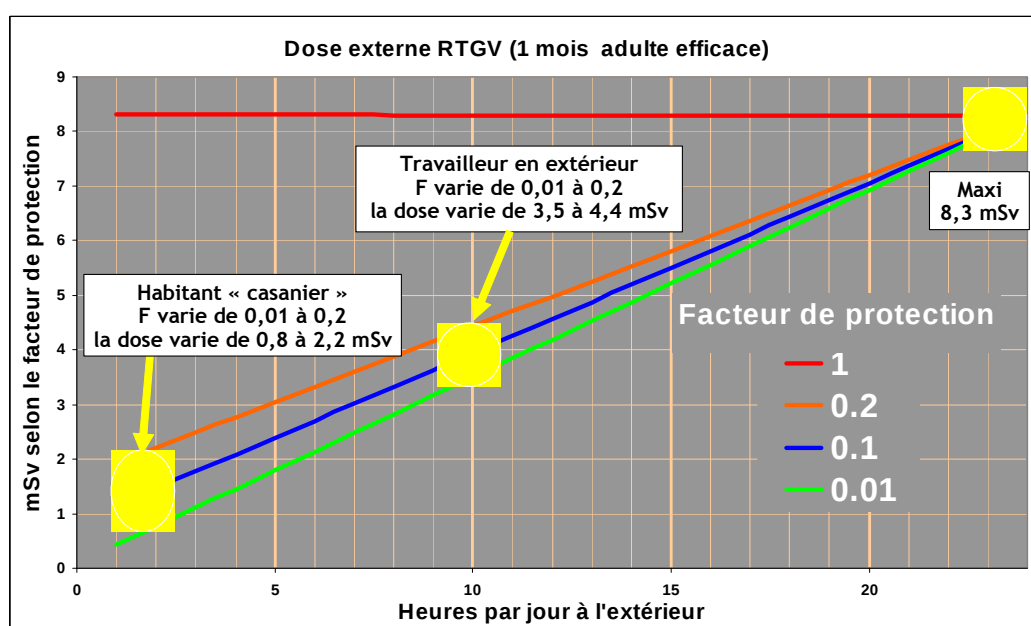


Figure 9 - Variation de la dose efficace reçue par irradiation externe due au dépôt radioactif en fonction du temps passé à l'extérieur. Calcul fait pour un adulte vivant à 1 km du site nucléaire, avec le scénario RTGV, en considérant différents facteurs de protection des bâtiments.

Si, dans le cas d'un habitant « casanier », il peut exister un facteur 3 de variation de la dose en fonction du facteur de protection, cette variation ne représente plus que 25 % de la dose dans le cas d'un travailleur en extérieur ; en revanche, dans ce dernier cas, la dose reçue est entre 2 et 4 fois plus élevée que pour un habitant casanier, illustrant bien l'influence prépondérante du paramètre « proportion du temps passé à l'extérieur ».

Le cas d'une personne passant 100 % de son temps à l'extérieur, présenté comme théorique (cas extrême), pourrait néanmoins être rencontré dans des cas suivants :

- personne faisant du camping pendant un mois (aucune protection assurée par la tente) ;

- personne sans domicile fixe dormant à l'extérieur.

De telles situations peuvent être particulièrement rencontrées en été et devraient être considérées dans la gestion post-accidentelle (cf. § 2.3.3), sans pour autant en tenir compte dans les calculs de doses prédictives, en raison de la spécificité de ces situations.

Il convient également de considérer comme « lieu extérieur » non seulement les zones directement à l'air libre, mais également tous les abris peu protecteurs tels que voitures, camions, camping cars ainsi que toutes les constructions légères comme les « mobil-homes », chalets en bois, unités préfabriquées, hangars (généralement en tôle) ou assimilés... Ces locaux, non ou peu protecteurs, peuvent concerner par exemple :

- des établissements scolaires, salles de cours supplémentaires, gymnases... ;
- des bureaux ou autres lieux de travail (cabines de péages, stations service...) ;
- des hangars convertis en boutiques dans certains centres commerciaux ;
- des cabanes de chantiers, sur lesquels travaillent des ouvriers itinérants ou saisonniers, qui parfois vivent également en mobil-home (donc avec un budget-temps assimilable à 100 % en extérieur).

Le temps passé dans ces véhicules ou locaux devrait être pris en compte au titre du temps passé à l'extérieur et, à l'instar de ce qui a été dit précédemment à propos du camping et des personnes sans domicile fixe, les situations où des personnes seraient amenées à dormir dans de tels locaux devraient être considérées de façon spécifique dans le cadre de la gestion post-accidentelle.

La plupart des enquêtes effectuées en France sont peu adaptées aux besoins du calcul de dose car elles sont majoritairement du type « occupation du temps ». Toutefois, un travail mené par l'IRSN en 2004 a permis d'analyser les informations disponibles dans ces enquêtes. Il en ressort qu'actuellement, l'enquête INSEE de 1998-1999 pour les adultes et l'enquête de Roy et al. (1993) pour les enfants sont intégrées dans la base de données CIBLEX et font référence au niveau national. Il se dégage un consensus fort pour ce qui concerne la « population générale », pour laquelle environ 90 % du temps est passé à l'intérieur. Néanmoins, la méconnaissance des temps passés à l'extérieur par les enfants dans des structures de type centres aérés ou colonies de vacances est soulignée. Il en est de même des activités de loisirs extérieurs de la population générale durant les congés, en raison de l'interruption de l'enquête durant le mois d'août. Par ailleurs, si l'effet du climat (nord/sud) est théoriquement pris en compte par la différenciation des ZEAT, celle de la saison induisant une variation de la durée du jour (et donc du temps passé à des occupations à l'extérieur) allant jusqu'à plusieurs heures, n'est pas considérée.

Les budgets espace-temps des groupes dont la profession implique un travail en extérieur sont moins bien appréhendés. Pour ces derniers, le temps passé à l'extérieur varierait de 30 à 50 %. Cette proportion de temps extérieur beaucoup plus importante que celle de la population générale est notée et discutée par le GT « Hypothèses », en particulier pour certaines catégories professionnelles qui sont indispensables à la vie locale (pompiers, gendarmes, éboueurs...).

Le cas des enfants a également été discuté au sein du GT : leur mode de vie peut comporter des périodes prolongées en extérieur (centres aérés, colonies de vacances...) et les facteurs de dose ne sont pas spécifiques à leur taille. Toutefois, en considérant une hauteur de 50 cm au lieu de 1 m au dessus du sol, les facteurs de dose par irradiation externe ne seraient modifiés que modérément.

2.3.3. RECOMMANDATIONS POUR LE CALCUL DES DOSES LIÉES À L'IRRADIATION EXTERNE DUE AUX DÉPÔTS RADIOACTIFS

- Pour l'évaluation de la dose prévisionnelle susceptible d'être reçue au cours du premier mois (éloignement immédiat) :

- 1) Au cours du premier mois suivant l'accident, **il est raisonnablement prudent de considérer, pour le calcul des doses prévisionnelles, que le dépôt initial estimé par le calcul ne subit aucune modification autre que celle liée à la décroissance radioactive.** En particulier, il convient de ne pas tenir compte de l'éventuelle atténuation du rayonnement qui pourrait résulter du transfert des radionucléides en profondeur dans les sols meubles ou du fait du ruissellement via le réseau hydrographique.
- 2) Le GT « Hypothèses » **recommande de faire le calcul de la dose liée à l'irradiation externe en considérant une personne ayant un temps de présence à l'extérieur de 50 % et en négligeant le temps passé dans des territoires moins ou non contaminés.** Ce choix ne correspond pas à la valeur habituellement observée pour la population en général, nettement plus faible (moins de 20 %), mais permet de tenir compte des activités particulières, professionnelles ou de loisir, qui entraînent une présence à l'extérieur plus importante que la moyenne. Ce choix permet ainsi aux populations vivant immédiatement en périphérie de la zone d'éloignement de pouvoir exercer pratiquement tous types d'activités usuelles sans restrictions significatives (autres que l'interdiction de consommer des denrées d'origines locales ou de fréquenter certains lieux tels que forêt, parcs publics...).
- 3) La recommandation qui précède implique une gestion spécifique des personnes sans domicile fixe ou pratiquant le camping. **Dans le cas où les autorités n'envisageraient pas d'interdire les activités de camping sur les territoires contaminés ou de reloger les personnes sans domicile fixe ou vivant en caravane dans des bâtiments en matériaux durs, le GT « Hypothèses » estime que le calcul des doses prévisionnelles dues à l'irradiation externe devrait tenir compte du cas des personnes ayant un temps de présence à l'extérieur de 100 %.** Le GT n'a pas examiné plus en détail l'étendue territoriale de cette condition, mais il paraît *a priori* raisonnable de l'appliquer à l'ensemble de la zone de protection des populations ; toutefois, ce point mériterait éventuellement une étude plus approfondie.
- 4) Il existe une grande variabilité des valeurs des facteurs de protection associés aux bâtiments. Le GT « Hypothèses » note que, dans la gamme habituelle de variation de ce paramètre (0,01 à 0,2), la valeur choisie a une influence d'ordre secondaire par rapport à celle du taux de présence à l'extérieur et considère que la valeur de 0,1 utilisée par défaut dans les modèles de l'IRSN est satisfaisante car adaptée aux matériaux de construction traditionnels les plus

répandus. Toutefois, le GT « Hypothèses » attire l'attention sur la faible protection apportée par certaines constructions de petite taille fabriquées avec des matériaux légers (chalets en bois, mobil homes...), car les occupants de telles constructions se trouvent plus proches des sources extérieures de rayonnement (effet de géométrie) et ces matériaux ont un faible pouvoir atténuant ; il est par conséquent recommandé qu'un état des lieux de ce type de construction soit réalisé autour des sites nucléaires, *a minima* dans le rayon des PPI. Dans le cas où de telles constructions seraient particulièrement fréquentes, il serait alors prudent de considérer une valeur plus élevée du facteur de protection utilisé pour le calcul des doses prévisionnelles.

- 5) Le GT « Hypothèses » a constaté la difficulté de modéliser de manière réaliste la diversité des zones urbaines, au sein desquelles le dépôt radioactif peut avoir une distribution complexe. Par conséquent, un paramétrage simplifié et conservatif des outils de modélisation semble approprié pour fournir une estimation de l'ordre de grandeur de la dose due à l'irradiation externe ; toutefois, le GT « Hypothèses » constate que certains phénomènes sont actuellement négligés, principalement le dépôt sur les surfaces verticales et l'influence des arbres plantés en milieu urbain, pouvant conduire à sous-estimer les doses. **Dans ces conditions, il est recommandé de poursuivre les développements de la modélisation de l'exposition en milieu urbain afin de mieux prendre en compte ces facteurs.** Le GT « Hypothèses » souligne également le fait que les doses qui pourraient résulter de la fréquentation des jardins et parcs publics en zone urbaine, ainsi que les forêts, ne sont actuellement pas prises en compte dans les modèles prédictifs ; cette difficulté est à relativiser car dans la zone de protection des populations, le GT1 du CODIR-PA (protection de la population) recommande des restrictions d'accès dans les jardins, parcs et forêts, publics ou privés.

• Pour l'évaluation de la dose prévisionnelle susceptible d'être reçue au cours de la première année (éloignement différé) :

- 1) Le GT « Hypothèses » considère qu'il n'est pas envisageable d'évaluer, dès la sortie de la phase d'urgence, les doses prévisionnelles reçues par irradiation externe au cours de l'année suivant l'accident, en l'absence d'une cartographie précise des dépôts, notamment en milieu urbain, fondée sur des mesures représentatives. **En conséquence, il est déconseillé de faire une telle évaluation en début de phase de transition post-accidentelle ; la décision d'un éventuel éloignement différé motivé par le niveau de dose reçue à long terme ne revêt pas un caractère d'urgence et peut attendre les résultats d'évaluation fournis ultérieurement, à partir de données de terrains (mesures notamment) représentatives de la situation réelle. Il est recommandé d'anticiper l'éventualité d'un éloignement différé en recourant à une communication appropriée, soulignant notamment l'absence d'un caractère d'urgence et l'engagement d'une démarche de concertation préalable à la décision.**
- 2) Il découle de la recommandation précédente **une incitation à réaliser le plus rapidement possible des campagnes de mesure du débit de dose dans les zones urbaines, y compris à**

l'intérieur des bâtiments. Ces mesures devraient être faites en priorité sur les territoires où les populations peuvent continuer à résider (dans la zone de protection des populations), en commençant par la périphérie de la zone d'éloignement si celle-ci est mise en place dès le début de la phase de transition, ou à défaut en partant des zones habitées les plus proches du site nucléaire accidenté.

2.4. HYPOTHÈSES POUR LE CALCUL DES DOSES DUES À L'INGESTION INVOLONTAIRE DE PARTICULES RADIOACTIVES

2.4.1. DONNÉES ET MODÈLES DISPONIBLES POUR L'ÉVALUATION DE LA DOSE DUE À L'INGESTION INVOLONTAIRE

L'ingestion involontaire de particules radioactives peut se produire de différentes manières :

- soit par ingestion directe de particules du sol qui adhèrent aux aliments mal lavés ;
- soit par contact main-bouche, les mains étant elles-mêmes contaminées par contact de terres contaminées ou de surfaces portant une contamination labile.

Dans le premier cas, le calcul de la dose engagée découle du produit « quantité de sol ingéré » × « activité massique du sol » × « coefficient de dose par unité incorporée ». Dans le second cas, la dose engagée dépend de l'activité surfacique de la main contaminée, de la fraction de cette contamination qui est transférée à la bouche et de la fréquence journalière des contacts main-bouche. La contamination des mains peut se faire de deux manières : soit lors d'activités à l'extérieur, avec un contact accru avec des particules de sol (contamination visible sur des mains sales) ; soit en étant présent dans un environnement entièrement contaminé, où la contamination est véhiculée par des poussières et non directement le sol (contamination des mains non visible).

La modélisation de l'ingestion involontaire faite dans le cadre des études de scénarios proposées pour les travaux du CODIR-PA fait intervenir divers paramètres pouvant être fortement variables et difficilement prévisibles :

- la quantité de sol directement ingéré dépend du mode de vie (contexte rural ou urbain) et de l'âge ; en pratique, l'évaluation de ce paramètre en contexte post-accidentel repose sur l'hypothèse que l'ingestion ne se produit que lorsque la personne se trouve à l'extérieur (cf. budget « espace-temps ») ; les données publiées indiquent que les quantités ingérées sont plus importantes chez les jeunes enfants. Par exemple, l'INERIS considère une ingestion de 150 mg/j pour les enfants de moins de 12 ans (50 mg/j pour les personnes de plus de 12 ans), mais cette valeur très élevée ne concerne que moins de 1% des enfants de cette classe d'âge et conduit à maximiser le scénario d'exposition. Pour les scénarios proposés pour le CODIR-PA, l'IRSN a utilisé les valeurs suivantes : 125 mg/j pour les enfants de moins d'un an ; 100 mg/j pour les enfants de 1 à 7 ans ; 50 mg/j pour les enfants de 7 à 12 ans et 40 pour les personnes de plus de 12 ans ;
- l'activité massique du sol n'est pas la même selon qu'on considère une pellicule superficielle concentrant la contamination (0,5 mm) ou une épaisseur plus importante de sol (1 cm pour un

sol meuble), avec une contamination diluée ; pour ses calculs de conséquences post-accidentelles, l'IRSN n'a retenu que la valeur de 0,5 mm, qui est un choix conservatif ;

- l'activité surfacique des mains dépend de nombreux facteurs (contamination des surfaces touchées, elle-même mal connue à l'intérieur des habitations où elle est supposée être $1/10^{\text{ème}}$ du dépôt extérieur ; surface de la main ; facteur d'adhérence de la contamination sur la main) et, globalement, elle est difficile à prévoir par le calcul ; il en est de même pour la fraction transférée à la bouche. Pour ses calculs, l'IRSN a utilisé des valeurs moyennes disponibles dans les publications techniques mais non représentatives de la population française, ni de la variabilité des situations ;
- la fréquence des contacts main-bouche dépend de l'âge ; il est couramment pris l'hypothèse de 10 contacts par heure pour les jeunes enfants.

Certains de ces facteurs sont également susceptibles d'évoluer dans le temps :

- le dépôt diminue par décroissance radioactive ;
- dans les sols meubles, les radionucléides tendent à migrer en profondeur (avec pour conséquence la diminution de l'activité massique des particules de sol) ;
- sur les surfaces dures, la contamination déposée tend à se fixer, entraînant une réduction de la contamination par contact main-bouche ;
- la quantité de terre sur les mains peut être très variable selon la saison.

Sauf pour la décroissance radioactive, la prévision des effets liés à ces phénomènes est difficile et il est préférable de les négliger, au moins au cours du premier mois suivant l'accident, de manière à disposer de résultats d'évaluation conservatifs. De même, il semble délicat de spéculer sur la réduction de contamination qui pourrait être obtenue au bout d'une semaine grâce aux actions de nettoyage mises en œuvre, comme cela avait été initialement proposé par le GT1 pour ce qui concerne l'éloignement immédiat. Dans ces conditions, les calculs sont effectués en considérant un dépôt sur un sol agricole (i.e., surface meuble), sans tenir compte d'une éventuelle migration en profondeur, et en supposant que le dépôt à l'intérieur des habitations est égal à $1/10^{\text{ème}}$ de celui s'étant produit à l'extérieur.

Dans tous les scénarios accidentels étudiés dans le cadre des travaux du CODIR-PA, il apparaît que ce sont les enfants de moins d'un an qui recevraient les doses les plus importantes dues à l'ingestion involontaire de contamination. Dans le cas des scénarios affectant un REP, la contribution de cette voie d'exposition à la dose efficace est plus faible que celle due à l'irradiation externe par le dépôt. Dans le cas du scénario « plutonium », pour lequel le dépôt n'entraîne pratiquement aucune irradiation externe, la dose due à l'ingestion involontaire devient la contribution principale chez le jeune enfant (98% de la dose efficace reçue au cours du premier mois, hors doses reçues pendant la phase d'urgence, si on exclut, par hypothèse, celle due à l'ingestion de denrées alimentaires d'origine locale). C'est donc plus particulièrement pour ce scénario que le GT « Hypothèses » a examiné le sujet de l'ingestion involontaire. En pratique, il apparaît que la mise en place d'une zone d'éloignement immédiat serait théoriquement déterminée en fonction de la dose efficace susceptible d'être reçue au

cours du premier mois par les enfants de moins d'un an, en ne considérant que la dose due à l'ingestion involontaire, c'est-à-dire une estimation entachée d'une forte imprécision.

L'examen du scénario « plutonium » montre également que pour les adultes, dont la dose globalement reçue au cours du premier mois (hors ingestion alimentaire) serait nettement plus faible que celle des enfants de moins d'un an, la part due à l'inhalation de particules remises en suspension serait significative (plus importante que celle due à l'ingestion involontaire), selon les hypothèses de calcul retenues. Dans ces conditions, en supposant que les enfants en bas âge vivant sur les territoires contaminés bénéficieraient d'une protection particulière limitant leur contact avec des surfaces contaminées à l'extérieur des habitations, il conviendrait alors de tenir compte de la voie d'exposition « inhalation » pour l'adulte dans le calcul de la dose prévisionnelle reçue le premier mois, servant à définir la zone d'éloignement immédiat.

Cette possibilité a été examinée par le GT « Hypothèses » dans le cas du scénario « plutonium ». le code ASTRAL de l'IRSN permet de calculer la dose due à l'inhalation des poussières remises en suspension en estimant l'activité volumique (Bq/m^3) de ces poussières dans l'air par la multiplication de l'activité surfacique (Bq/m^2) présente dans le premier centimètre de sol par un coefficient de remise en suspension K (en m^{-1}) ; dans le cas d'un sol labouré, il est supposé que la contamination surfacique initiale a été homogénéisée sur 15 cm ; cette hypothèse est convenable pour un dépôt sur un sol meuble mais est incohérente avec le choix fait pour le calcul de la dose par ingestion involontaire, qui considère un dépôt concentré sur une épaisseur de 0,5 mm. Le coefficient K est pris égal à 10^{-7} m^{-1} , qui représente une valeur réaliste mais qui ne tient pas compte de situations particulières où ce coefficient peut être plus élevé (10^{-4} m^{-1}), lorsque les conditions climatiques sont sèches ou à l'occasion de chantiers salissants. Sur le plus long terme (une année ou plus), le coefficient K tend à diminuer (entre 10^{-6} et 10^{-10} m^{-1}).

2.4.2. RECOMMANDATIONS POUR LE CALCUL DES DOSES PRÉVISIONNELLES DUES À L'INGESTION INVOLONTAIRE DE PARTICULES RADIOACTIVES

- 1) Le GT « Hypothèses » souligne les difficultés de mener des évaluations prédictives des doses susceptibles d'être reçues par ingestion involontaire de la contamination déposée, en raison, d'une part, de la méconnaissance de certains paramètres intervenant dans le calcul, et d'autre part, de la grande variabilité des phénomènes en cause, selon les conditions environnementales et le mode de vie des personnes.
- 2) D'une manière générale, pour le calcul des doses prévisionnelles reçues le premier mois, il est recommandé de retenir des hypothèses pénalisantes sur certains facteurs environnementaux, en supposant que le dépôt reste entièrement en surface (0,5 mm), qu'il ne se fixe pas sur les supports durs et que le bénéfice apporté par d'éventuelles actions de nettoyage est négligé. Toutefois, dans le cas des radionucléides à vie courte, la décroissance radioactive doit être prise en compte. Il est également supposé que la contamination labile dans les habitations est 10 fois plus faible que celle de l'extérieur.

- 3) Pour le calcul des doses susceptibles d'être reçues par une personne par ingestion involontaire de particules radioactives, **il convient de retenir des hypothèses identiques à celles utilisées pour le calcul de dose due à l'irradiation externe du dépôt, concernant le budget espace-temps** (cf. § 2.3.3).
- 4) Le GT « Hypothèses » considère qu'il n'est pas envisageable d'évaluer, dès la sortie de la phase d'urgence, les doses prévisionnelles reçues par ingestion involontaire au cours de l'année suivant l'accident, en l'absence d'une connaissance précise des dépôts labiles, notamment en milieu urbain, fondée sur des mesures représentatives. **En conséquence, il est déconseillé de faire une telle évaluation en début de phase de transition post-accidentelle ; la décision d'un éventuel éloignement différé motivé par le niveau de dose reçue à long terme ne revêt pas un caractère d'urgence et peut attendre les résultats d'évaluation fournis ultérieurement, à partir de données de terrains (mesures notamment) représentatives de la situation réelle. Il est recommandé d'anticiper l'éventualité d'un éloignement différé en recourant à une communication appropriée, soulignant notamment l'absence d'un caractère d'urgence et l'engagement d'une démarche de concertation préalable à la décision.**
- 5) **Lorsque l'ingestion involontaire constitue la voie d'exposition prépondérante**, c'est-à-dire pour les scénarios accidentels qui conduisent à un dépôt radioactif provoquant un faible risque d'irradiation externe, **il serait préférable de ne pas décider un éloignement sur la seule base des évaluations des doses prévisionnelles susceptibles d'être reçues par les enfants d'un an et de considérer aussi le cas des adultes, en tenant compte également de l'inhalation de particules radioactives remises en suspension, dont la contribution relative à la dose peut être significative.** Bien que les doses estimées pour un adulte soient moins élevées, conduisant à une zone d'éloignement de moindre ampleur, le risque immédiat pour les enfants demeurant dans la zone de protection des populations devrait rester limité, surtout si le maintien des populations sur place est accompagné de recommandations de mesures d'hygiène simples (nettoyer les surfaces accessibles à l'intérieur des habitations, se laver régulièrement les mains, éviter de laisser les enfants jouer directement sur le sol à l'extérieur, interdire l'accès aux parcs et jardins publics, enlever les chaussures avant de pénétrer à l'intérieur des habitations, laver régulièrement les animaux domestiques dont le pelage peut facilement capter la contamination extérieure...).

3. ESTIMATION DE LA CONTAMINATION PRÉVISIBLE DES DENRÉES AGRICOLES

3.1. LES FACTEURS AYANT UNE INFLUENCE SENSIBLE SUR LA CONTAMINATION DES DENRÉES

3.1.1. LES BASES DE CONNAISSANCE SUR LA CONTAMINATION DES DENRÉES AGRICOLES EN SITUATION ACCIDENTELLE

La modélisation du comportement moyen des radionucléides dans les produits végétaux et animaux est globalement satisfaisante et fiable pour répondre aux besoins d'expertise en situation post-accidentelle, à condition d'avoir une bonne connaissance des dépôts et des paramètres contextuels (cf. § 3.1.2).

Les bases de connaissances existent pour :

- la plupart des denrées agricoles : légumes, laits, viandes (bœuf et mouton), céréales ;
- les isotopes de l'iode et du césium, pour lesquels la modélisation a été validée suite à l'accident de Tchernobyl, ainsi que d'autres radionucléides d'intérêt (Ru, Ag, Sr) qui ont fait l'objet de travaux expérimentaux. En ce qui concerne les transuraniens, les paramètres radioécologiques relatifs au transfert foliaire sont peu documentés et ils sont habituellement assimilés aux radionucléides de type "peu mobiles" (en termes de transfert aux végétaux et translocation), en utilisant les facteurs de transfert du strontium. Des travaux expérimentaux de l'IRSN (2005) montrent que cette assimilation semble correcte.

Il est important de tenir compte du fait que, pour un dépôt initial donné, la contamination des denrées alimentaires est très évolutive au cours du temps, surtout dans les premières semaines suivant les retombées radioactives. Par ailleurs, même si le comportement « moyen » des radionucléides dans les milieux agricoles et naturels est globalement facile à prévoir, il peut exister une forte variabilité des situations observées autour de la valeur moyenne, en raison de l'influence de nombreux facteurs environnementaux spécifiques et locaux.

Par exemple, les résultats de mesures de la contamination du lait de vache collecté sur un territoire affecté par des retombées radioactives peuvent présenter une dispersion de l'ordre d'un facteur 10, liée simplement au fait que les pratiques d'alimentation peuvent varier d'un élevage à l'autre, en fonction des compléments alimentaires (non contaminés, contrairement à l'herbe) donnés au bétail. Cet exemple montre qu'il est difficile de se prononcer sur l'importance des conséquences des retombées radioactives sur un territoire donné et de prévoir leur évolution, en ne considérant que des résultats de mesure. Il est nécessaire pour cela d'interpoler et d'extrapoler à l'aide de modèles radioécologiques tenant compte de paramètres physiques et environnementaux propres à la situation étudiée.

Ainsi, la figure 10 montre l'interprétation, à l'aide du modèle ASTRAL, d'une série de mesures de césium 137 dans le lait de vache dans l'est de la France, entre mai et juillet 1986.

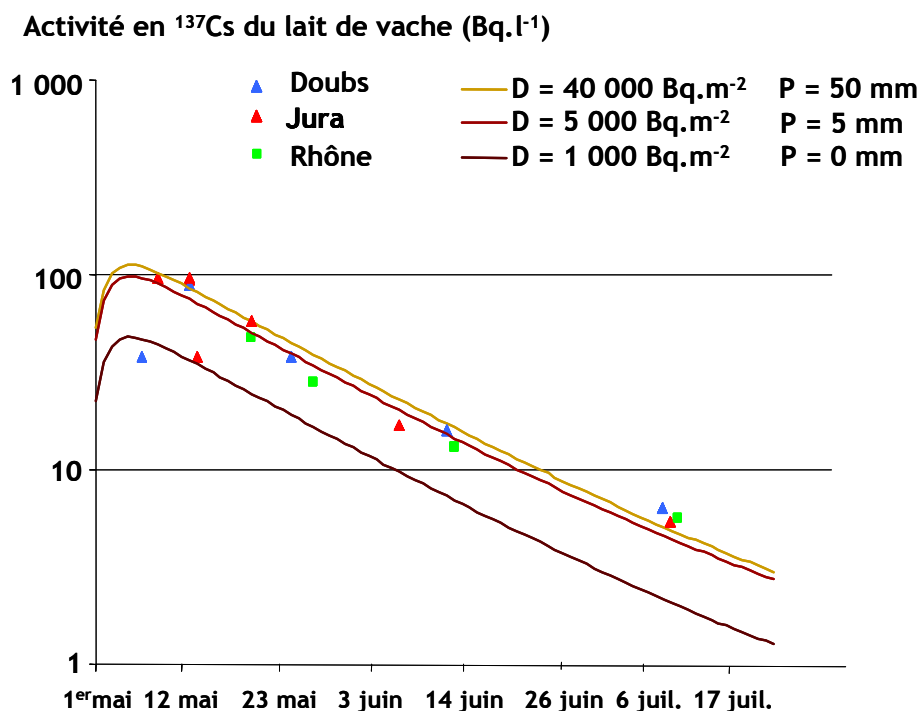


Figure 10 - Interprétation d'une série de mesures du césium 137 dans le lait de vache collecté dans 3 départements de l'est de la France entre mai et juillet 1986. Les 3 courbes ont été obtenues à l'aide du modèle radioécologique ASTRAL, en considérant différentes valeurs de dépôt et de hauteur de pluie. Ces courbes encadrent la gamme de valeurs mesurées et expliquent les évolutions constatées (effet de dilution de la contamination initiale, causée par la croissance de l'herbe consommée par les vaches).

Ce graphique montre que les valeurs observées dans le lait peuvent être expliquées par un dépôt variant entre 1000 et 5000 Bq/m^2 , lui-même déterminé par des hauteurs de pluies comprises entre 0 et 5 mm ; lorsque les hauteurs des pluies étaient plus élevées (50 mm), comme cela a pu être mesuré localement dans les trois départements considérés, le dépôt a pu être notablement plus important (40 000 Bq/m^2) mais sans conséquences significatives sur le niveau de contamination du lait par rapport celui correspondant à un dépôt formé avec 5 mm de pluie ; ce phénomène s'explique par la saturation du dépôt foliaire lors de fortes pluies, l'excédent de dépôt apporté par les pluies intenses allant directement dans la terre ou étant évacué par ruissellement en surface.

Ce graphique montre également la réduction rapide de la contamination du lait (d'un facteur 10) au cours du premier mois suivant le dépôt, due à la diminution de la contamination de l'herbe consommée par les vaches, par croissance continue de la biomasse qui dilue la contamination initiale. Les mesures de césium 137 dans le lait effectuées en juillet donnent des résultats un peu plus élevés que la prévision par ASTRAL (même en considérant un dépôt important), ce qui peut s'expliquer par une diminution du rendement de croissance de l'herbe à partir de fin juin 1986.

De la même façon, il est possible de réaliser des évaluations prédictives de la contamination des autres denrées agricoles, à l'aide du logiciel ASTRAL ou de tout autre outil de modélisation équivalent, en fonction du dépôt initial (en distinguant sa composante sèche et humide) et de paramètres physiques

et biologiques propres à chaque catégorie de denrées, qui peuvent être fortement variables, notamment en fonction de la saison.

Les exemples présentés ci-dessus montrent également qu'il faut être prudent dans l'interprétation des résultats de mesure pris isolément. En effet, certaines mesures peuvent ne pas être représentatives de la diversité des situations observables sur un territoire donné et peuvent, dans certains cas, conduire à sous-estimer l'importance des conséquences.

Dans le contexte des évaluations à mener en début de phase de transition, il s'agit de connaître en particulier :

- quelle serait la contamination maximale susceptible d'être observée dans chaque catégorie de denrées agricoles produites en un point donné et, éventuellement, à quel moment ce maximum risque d'être observé (pour certains produits, cela peut être quelques jours à quelques semaines après le dépôt). Pour cela, il est souhaitable de tenir compte des productions qui existent effectivement sur les territoires, à la saison considérée, afin d'économiser l'effort de calcul et de rendre crédible les résultats d'évaluation, en évitant par exemple de calculer l'impact sur les cerises alors que l'accident s'est produit en novembre. Les résultats de ces évaluations permettraient alors d'identifier les territoires sur lesquels il y a un risque de dépassement des NMA, déterminant ainsi l'emprise des zones de surveillance des territoires ;
- quelle serait la dynamique d'évolution de la contamination de chaque catégorie de denrées agricoles, au moins sur le premier mois suivant la fin de l'accident. Cette connaissance est nécessaire pour le calcul des doses prévisionnelles par ingestion de denrées d'origine locale, servant à identifier la zone d'interdiction alimentaire ; elle servirait également à anticiper l'évolution probable des zones de surveillance alimentaire, une fois passé le maximum de contamination, sachant que l'ajustement effectif de ces zones ne serait décidé qu'après obtention de résultats de mesure significatifs.

Il est important de souligner qu'au début de la phase de transition, très peu de résultats de mesure de la contamination des denrées agricoles seraient disponibles pour caler la modélisation des conséquences sur ces denrées. Par la suite, au cours de la phase de transition, ces résultats devraient être plus nombreux et il est important de les interpréter à l'aide d'outils de modélisation tels qu'ASTRAL, afin de vérifier la cohérence des résultats, de les interpoler et d'actualiser les prévisions. En cas d'incohérence entre les résultats de la modélisation et certains résultats de mesure, deux causes principales seraient à explorer :

- soit dans les paramètres d'entrée du modèle, et en priorité les caractéristiques des dépôts (et les paramètres contextuels qui seront détaillés dans le paragraphe suivant) ;
- soit dans la représentativité des échantillons mesurés, et secondairement dans les opérations qui interviennent dans la chaîne prélèvement-traitement-métriologie.

3.1.2. PARAMÈTRES CONTEXTUELS IMPORTANTS POUR L'ÉVALUATION PRÉDICTIVE DE LA CONTAMINATION DES DENRÉES AGRICOLES

On désigne par « paramètres contextuels » les paramètres intervenant dans la modélisation des conséquences qui sont propres aux circonstances, au lieu et au moment de l'accident, par opposition aux paramètres radioécologiques (facteurs de transfert, constantes physiques ou biologiques) issus de travaux d'études et de recherche, qui ne sont pas discutés ici. En pratique, les paramètres contextuels sont des données d'entrées pour le calcul des conséquences radiologiques sur les denrées agricoles et naturelles.

- Les dépôts initiaux formés lors de la dispersion du panache radioactif

Les dépôts initiaux formés lors du passage du panache radioactif peuvent entraîner la contamination des végétaux (figure 11), soit par interception foliaire, soit par transfert racinaire de la fraction du dépôt conservée dans les sols.

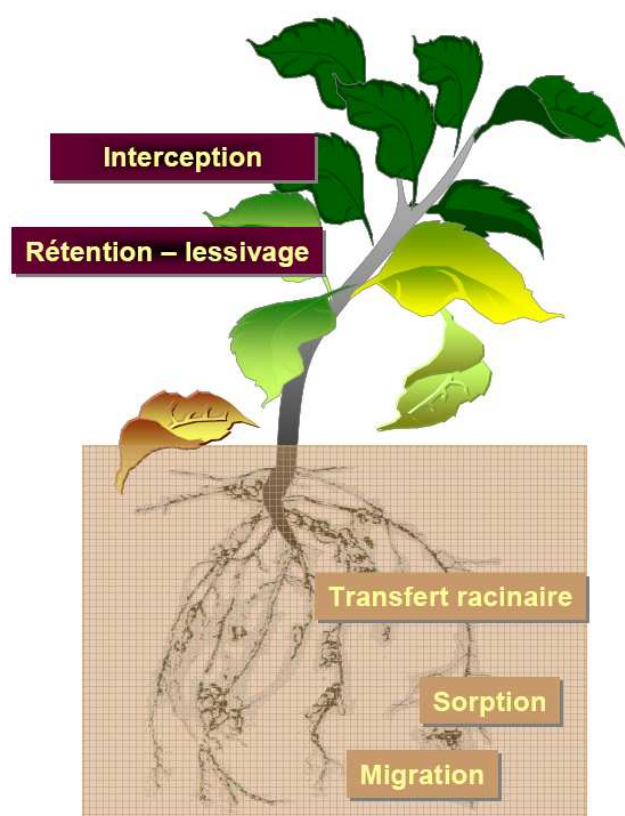


Figure 11 - Schéma illustrant les modes de contamination des végétaux lors du dépôt de radionucléides au moment de l'accident (interception foliaire) ou à la suite de la formation de ce dépôt (transfert racinaire).

En pratique, le transfert racinaire peut être négligé lors de la phase de transition post-accidentelle, celui-ci ne devenant significatif qu'au-delà de la première année suivant l'accident, pour les radionucléides persistant dans le sol tels que les césiums.

Les radionucléides interceptés par les feuilles sont quant à eux rapidement fixés par la plante (figure 12) ; il s'agit d'un facteur direct de contamination des légumes à feuilles ainsi que de l'herbe et des fourrages dès la fin de la formation des dépôts radioactifs. Les radionucléides fixés par les feuilles peuvent ensuite être transportés vers d'autres parties de la plante, notamment vers les organes de réserve (phénomène de translocation) ; il en résulte la contamination des racines, des fruits, des

graines mais aussi du bois qui constitue alors un réservoir de radionucléides provoquant la persistance de la contamination des fruits d'arbres au-delà de la première année.

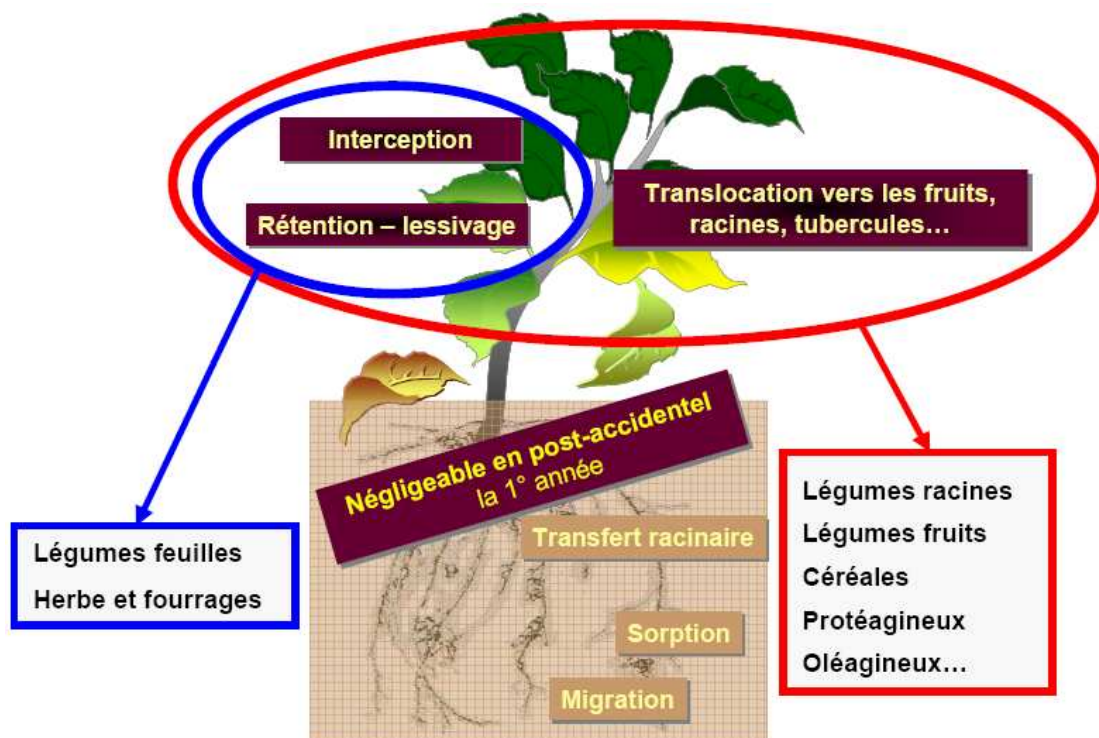


Figure 12 - Incidence du transfert foliaire et de la translocation sur la contamination, d'une part des légumes feuilles, de l'herbe et des fourrages, d'autre part des légumes racines et fruits et des cultures céréalières et assimilées. Le transfert racinaire est quant à lui négligeable au cours de la phase de transition post-accidentelle.

Pour évaluer la contamination des végétaux par interception foliaire, il est important de connaître la proportion du dépôt total sous forme sèche et humide, ainsi que, le cas échéant, la hauteur de pluie associée au dépôt humide. En début de phase de transition post-accidentelle, l'accès à ces données peut se révéler limité. Dans le cas où seul le dépôt total est connu (par modélisation ou à l'aide de résultats de mesures) :

- il est acceptable d'assimiler ce dépôt à un dépôt sec, même si en réalité il existe une fraction humide, dès lors que la hauteur de pluie associée est inférieure à 5 mm en moins d'une journée ;
- dans le cas contraire (hauteur quotidienne de pluie supérieure à 5 mm), cette assimilation peut conduire à une surestimation importante de la contamination des végétaux (et par conséquent des denrées animales).

Le sujet de la quantification initiale du dépôt et de ses paramètres associés est discuté plus en détail au paragraphe 4.

- **Cas des cultures dites « permanentes » (légumes)**

Les cultures permanentes concernent des denrées (typiquement des légumes) pouvant être récoltées pratiquement toute l'année (le cas échéant en pratiquant des cultures sous serres en hiver). Après chaque récolte, un nouveau cycle de culture est initié. Trois principaux paramètres contextuels peuvent avoir une influence sur la contamination de ce type de culture :

- le fait que les légumes soient cultivés en plein champ ou sous serre : lorsqu'un légume est cultivé sous serre, la contamination par l'interception foliaire est plus faible qu'en plein air et il est couramment admis une réduction d'un facteur 2 ; toutefois, ce facteur est peu étayé scientifiquement. Dans le contexte des évaluations prédictives en début de phase de transition, dont les objectifs sont rappelés au § 3.1.1., le GT « Hypothèses » estime inutile de considérer ce facteur de protection compte tenu de la diversité des situations de culture (sous serre ou non ; serres plus ou moins protectrices) sur un territoire donné. Ce choix va dans le sens de la prudence et les mesures de contamination qui seront faites ultérieurement permettront finalement de statuer sur la possibilité de commercialiser les légumes ;
- la durée de présence de la culture après la formation des dépôts radioactifs : si le légume est à maturité au moment de l'accident, il est susceptible d'être récolté rapidement (si on fait abstraction des éventuelles interdictions) et remplacé par une nouvelle culture qui ne sera pas contaminée par le dépôt foliaire ; à l'inverse, si le légume est à l'état de jeune pousse au moment de l'accident, il faut attendre le délai de maturité (par exemple 60 j pour une salade) avant d'envisager sa récolte et son remplacement par une nouvelle culture. Ces deux cas extrêmes ne conduisent pas au même niveau de contamination des produits au moment où ils sont récoltés (pour une salade, la contamination est maximale si elle est à maturité au moment de l'accident). Sur un territoire donné, on peut supposer que tous les stades entre ces cas extrêmes peuvent être rencontrés. Par ailleurs, la durée de présence maximale d'un type de légume donné peut être variable selon la variété ou les conditions climatiques (figure 13). Toutefois, dans l'hypothèse où cette durée serait plus longue que celle paramétrée par défaut dans le code ASTRAL (60 jours pour les légumes feuilles et 120 jours pour les légumes fruits), l'impact sur l'évaluation des doses prédictives est faible. Il ne paraît donc pas pertinent de chercher à ajuster ce paramètre selon le contexte local ou par variété de légume au moment de l'accident et il suffit de retenir les valeurs par défaut d'ASTRAL ;

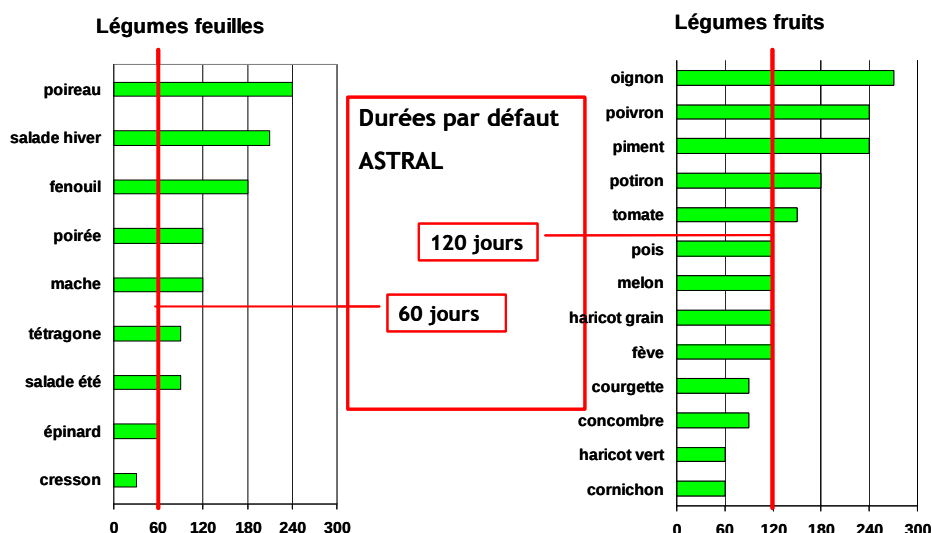


Figure 13 - Durées de culture observées (en vert) pour différentes variétés de légumes feuilles (à gauche) et de légumes fruits (à droite), comparées aux valeurs fixes (en rouge) retenues par défaut par le code ASTRAL pour chacune de ces deux catégories de légumes.

- le délai entre la récolte du légume et sa consommation à l'état frais : en principe, il existe un délai variable (pouvant être nul à plusieurs jours, voire plus pour les légumes racines) entre le moment de la récolte et le moment où il est consommé à l'état frais (pour le calcul des doses dues à l'ingestion au cours du premier mois, on peut faire abstraction des produits mis en conserve ou surgelés, supposés être consommés plus tard ; voir également le § 2.2.2.1). Dans le cas d'un accident entraînant le rejet de radionucléides à vie courte, ce délai de consommation peut conduire à une réduction de la contamination des denrées et par conséquent des doses reçues par le consommateur de ces denrées. Par exemple, dans le cas du scénario « RTGV » pour une personne située à 1 km sous le vent, la dose efficace due à l'ingestion de denrées d'origine locale au cours du premier mois baisse de 15% (pour un adulte en milieu rural) si on fait passer le délai de consommation des légumes frais de 0 jour à 4 jours ; la dose à la thyroïde d'un adolescent baisse quant à elle de 40%. Ces variations sont relativement peu importantes et il est acceptable de prendre une valeur réaliste de 2 jours, telle qu'utilisée par défaut par ASTRAL.

• Cas des cultures annuelles (ou « grandes cultures », type céréales)

Pour ce qui concerne les cultures à récolte annuelle (« grandes cultures »), les facteurs de transfert foliaires sont sous la dépendance directe des paramètres contextuels :

- le degré de développement du feuillage des plantes cultivées au moment où se forme le dépôt, représenté par l'indice de surface foliaire (LAI) qui détermine l'importance du transfert foliaire du dépôt ; ce paramètre peut varier de 0 à 6 m² de feuillage par m² de culture, avec une incidence directe sur la valeur du facteur de transfert foliaire ;

- le stade végétatif, par exemple la date de floraison, qui détermine l'importance de la translocation aux fruits, grains, organes de réserve... le taux de translocation peut varier d'un facteur 100 à 1000, voire plus.

Ainsi, la position de la date de dépôt par rapport au calendrier cultural a une incidence forte sur les valeurs de ces deux paramètres et, par conséquent, sur le niveau de contamination des denrées au moment de leur récolte. Par exemple, pour des conditions de dépôt données, du maïs récolté en octobre aura une contamination de 90 Bq/kg de césium 137 et de 0,0005 Bq/kg d'iode 131 si le dépôt radioactif a lieu début mai (situation analogue à celle observée lors de l'accident de Tchernobyl) ; la contamination de ce même maïs sera de 100 000 Bq/kg de césium 137 et de 2000 Bq/kg d'iode 131 si le dépôt a lieu début août ; enfin, la contamination du maïs sera quasi nulle si le dépôt a lieu en janvier.

Pour les calculs prédictifs de la contamination des « grandes cultures », les facteurs de transfert foliaire par défaut sont sélectionnés en fonction d'un « calendrier cultural standard ». Toutefois, il est observé une variabilité spatio-temporelle des conditions agro-météorologiques qui peut induire un décalage du « calendrier cultural » de 2 à 3 semaines d'une année sur l'autre ou d'une région à l'autre (figure 14) ; de plus, ces calendriers évoluent très sensiblement avec le changement climatique.

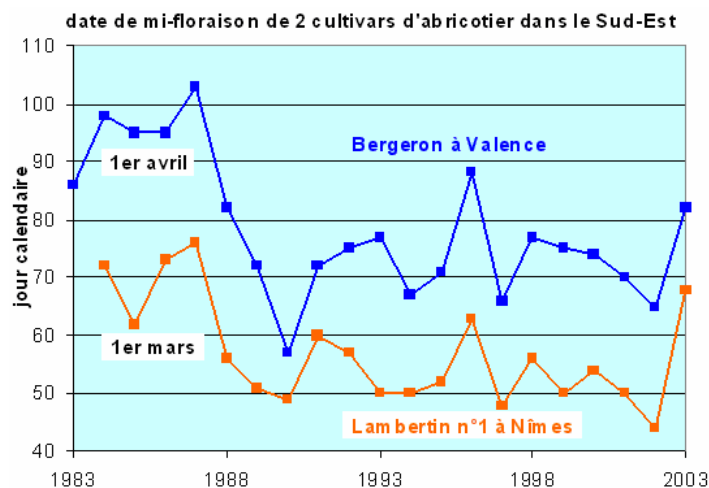


Figure 14 - Evolution de la date de mi-floraison des abricotiers entre 1983 et 2003, pour deux sites de culture du sud de la France. On observe des écarts de 10 à 30 jours d'une année sur l'autre ainsi que d'un site à l'autre, et une tendance générale à une floraison plus précoce en rapport avec le réchauffement climatique (source : INRA).

De ce fait, l'anticipation des calendriers culturaux réels est pratiquement impossible. Face à cette difficulté, le choix de valeurs maximales des facteurs de transfert foliaire pour chaque culture et quel que soit le moment de l'accident serait excessivement pénalisant et n'est pas approprié. Il est donc recommandé de prévoir, en situation d'accident nucléaire, une possibilité d'information rapide venant des services déconcentrés de l'État, qui permettrait d'avoir rapidement accès au calendrier cultural local de l'année correspondante ; cette information serait particulièrement utile dans le cas où l'accident survient au printemps ou en été, période au cours de laquelle il existe une variation très sensible des paramètres radioécologiques propres aux grandes cultures. A défaut de pouvoir obtenir une telle information, l'utilisation des facteurs définis par le « calendrier cultural standard » est une façon acceptable de faire les premières évaluations de conséquences sur les grandes cultures.

- **Cas des fruits d'arbres**

Il n'existe actuellement pas de modèle spécifique pour le cas des fruits d'arbres et peu de valeurs acquises expérimentalement permettent de paramétrer les calculs prédictifs de contamination. Dans les modèles radioécologiques, les fruits d'arbres sont habituellement regroupés dans la catégorie « légumes-fruits » (tomate...). Les quelques valeurs expérimentales disponibles concernent le raisin et ces valeurs peuvent être raisonnablement extrapolées aux fruits de vergers. Pour le scénario « RTGV », en supposant un dépôt au printemps, les calculs faits avec les valeurs maximales du facteur de transfert foliaire du césium au raisin donnent des résultats de contamination des fruits d'environ un facteur 10 plus élevés que ceux obtenus avec un modèle « légumes-fruits ». Une particularité des arbres est de stocker les substances radioactives dans le bois qui devient un réservoir durable pouvant contaminer les récoltes futures de fruits ; ce phénomène est particulièrement sensible si le dépôt a lieu au printemps ou en été. Il apparaît donc que l'évaluation prédictive des conséquences radiologiques sur les fruits d'arbres en appliquant un modèle conçu pour les légumes fruits peut conduire à des résultats qui peuvent ne pas être majorants.

Comme la consommation de fruits et la dose associée peuvent être élevées (notamment dans le sud de la France) et compte tenu de la valeur économique importante des fruits d'arbre, il est recommandé de développer un modèle « fruits » permettant *a minima* de prendre en compte le calendrier de développement des fruits par rapport à la date de dépôt, comme pour les denrées issues des « grandes cultures ».

- **Cas des denrées animales**

L'évaluation prédictive de la contamination des denrées animales, notamment le lait et la viande, conduit à s'intéresser à l'alimentation des animaux d'élevage, qui constitue la voie pratiquement unique de contamination de ces denrées.

Ainsi, pour le lait de vache, le premier paramètre examiné est la saisonnalité ; les paramètres contextuels sont en effet liés aux affouragements : quantités ingérées et surtout, succession et origines des affouragements, délai de stockage et tous les autres paramètres qui influent sur la contamination des fourrages récoltés ou pâturés (rendement de croissance de l'herbe à la suite du dépôt, indice de surface foliaire des cultures fourragères au moment de l'accident...). Dans le cas d'un dépôt en hiver par rapport à un dépôt au printemps, la contamination du lait peut être environ 100 fois plus faible en césiums et quasi nulle en iode 131. En effet, dans le cas d'un dépôt hivernal, la nourriture ingérée par le bétail durant les premiers mois provient d'une récolte antérieure au dépôt, puis de la récolte de fourrages n'ayant été contaminés qu'en début de croissance ; dans un tel cas, la contamination du foin et autres fourrages a fortement décru au moment de leur récolte, en raison de l'augmentation de biomasse entre le moment du dépôt et celui de la récolte, ainsi que de la décroissance radioactive très sensible pour l'iode 131.

Une autre incidence sensible du calendrier d'affouragement est de pouvoir provoquer un « effet retard » sur la contamination des denrées animales, en fonction du moment où s'est produit l'accident. Par exemple, une mise en pâture du bétail plusieurs semaines après l'accident (au printemps)

entraînera l'apparition d'une contamination différée du lait ; il en est de même lorsque le bétail consomme du fourrage contaminé au cours de l'hiver qui suit l'accident.

Ici encore, le calendrier d'affouragement peut varier selon le contexte climatique (mais également économique) de l'année en cours. Il est donc recommandé de prévoir, en situation d'accident nucléaire, une possibilité d'information venant des services déconcentrés de l'État, qui permettrait d'avoir rapidement accès au calendrier réel d'affouragement autour du site accidenté. Dans le cas contraire, il convient de veiller à ce que les paramètres contextuels utilisés par ASTRAL reposent sur des données statistiques régionales représentatives disponibles avant l'accident.

Certaines denrées animales sont plus sensibles que d'autres à la contamination radioactive ; c'est le cas notamment du lait de chèvre ou de brebis. Il convient d'en tenir compte lors des évaluations prédictives de conséquences radiologiques. De même, se pose la question des conséquences sur les produits laitiers issus de la transformation du lait, avec une attention toute particulière sur les produits frais. Les études environnementales réalisées par l'IRSN pour le lait de chèvre transformé en fromage montrent qu'il est acceptable d'assimiler un kilogramme de fromage frais à un litre de lait de chèvre, en termes de contamination.

3.2. RECOMMANDATIONS POUR LE CALCUL PRÉDICTIF DE LA CONTAMINATION DES DENRÉES AGRICOLES AU COURS DU PREMIER MOIS SUIVANT LA FIN DE L'ACCIDENT

- 1) Pour le calcul prédictif des doses dues à l'ingestion de denrées locales, **il est important de considérer en priorité les denrées susceptibles d'être récoltées puis consommées dans le mois qui suit la fin de l'accident** ; il convient à cet effet de disposer rapidement (avant la fin de la phase d'urgence) d'un inventaire qualitatif des denrées pertinentes dans le contexte local de l'installation accidentée, en tenant compte de la date de l'accident.
- 2) **Pour les denrées cultivées localement mais susceptibles d'être récoltées plus d'un mois après l'accident (ex. céréales, fruits d'arbre, selon le moment de l'accident), il n'est pas impératif de les considérer lors des évaluations initiales de conséquences**, car l'enjeu dosimétrique et commercial n'est pas immédiat. L'évaluation de la contamination de ces denrées peut se faire dans un second temps, au cours du mois à venir, en tenant compte des résultats de mesure et des données contextuelles disponibles (voir aussi la recommandation 4).
- 3) **Pour le calcul prédictif de la contamination des légumes produits sur une territoire donné au cours du premier mois suivant l'accident, il est recommandé de négliger l'effet protecteur des serres et d'utiliser des valeurs réalistes (par exemple celles utilisées par défaut par le code ASTRAL) pour la durée de présence maximale des cultures de légumes exposées directement aux retombées radioactives et pour le délai entre récolte et consommation des légumes à l'état frais**. Concernant l'évaluation des doses dues à l'ingestion de denrées d'origine locale, il est fait l'hypothèse que la consommation quotidienne de légumes frais provient de cultures qui étaient en cours au moment de l'accident, produisant des légumes arrivant à maturité au cours du premier mois suivant la fin des rejets. Cette

hypothèse est réaliste pour le premier mois car il n'est pas envisageable de récolter, au cours de cette période, des légumes mis en culture après l'accident (délai de croissance de l'ordre de 60 jours).

- 4) **Pour le calcul prédictif de la contamination des denrées issues de « grandes cultures » (type céréale), des fruits d'arbres et des denrées d'origine animale, il est important de pouvoir connaître le calendrier cultural réel et le calendrier d'affouragement autour du site accidenté, ce calendrier étant variable d'une année à l'autre et d'un lieu à l'autre.** En effet, la contamination de ces denrées est très sensible au stade de développement des cultures et de l'herbe au moment de l'accident. En l'absence d'information immédiatement disponible, le GT « Hypothèses » recommande d'utiliser les valeurs définies par défaut pour le calendrier cultural et le calendrier d'affouragement, et de mener les études permettant de renforcer la connaissance générale relative aux dates clés de culture et aux modes d'affouragement afin que les paramètres par défaut soient les plus robustes possible, compte tenu des spécificités de chaque territoire.
- 5) **Dès les premières évaluations de conséquences radiologiques et dosimétriques, il est important de considérer la présence éventuelle de denrées animales particulièrement sensibles à la contamination (lait de chèvre et de brebis notamment).** Pour les produits frais dérivés du lait (fromages blancs et yaourts), susceptibles d'être consommés ou commercialisés dans des délais courts après l'accident, il est acceptable d'assimiler leur contamination (en Bq/kg) à celle du lait frais (en Bq/l) qui en est à l'origine. Pour ce qui concerne les fromages « affinés », l'activité massique dépend du délai de stockage (environ 12 jours au minimum pour les fromages de chèvres, beaucoup plus pour les fromages persillés de brebis...) : par rapport au lait frais, les activités des radionucléides à vie courte tendent à diminuer, en particulier l'iode 131 (facteur de décroissance $\approx 0,35$ pour 12 jours), compensant ainsi, au moins partiellement, l'augmentation d'activité massique liée à la dessiccation du fromage.
- 6) **Le GT « Hypothèses » recommande le développement de modèles radioécologiques dédiés à l'évaluation des conséquences sur le lait de brebis ou de chèvres ainsi que sur les fruits d'arbres,** car la pratique actuelle consistant à assimiler ces produits respectivement à du lait de vache et à des légumes-fruits peut conduire à sous estimer les conséquences en situation post-accidentelle et, à ce titre, n'est pas acceptable.

Remarque :

Les denrées alimentaires d'origine naturelle (baies sauvages, champignons, pissenlits, gibiers, poissons...) devraient être traitées selon la même approche que pour les denrées issues de l'agriculture ou des jardins, dès lors qu'elles sont susceptibles d'être présentes en quantité significative sur le territoire considéré par les évaluations prédictives. Toutefois, au cours du premier mois suivant l'accident, ce sont principalement les produits consommés pour leurs feuilles (salades...) qui peuvent contribuer significativement à la dose due à l'ingestion alimentaire.

4. ESTIMATION PRÉDICTIVE DES DÉPÔTS RADIOACTIFS AU DÉBUT DE LA PHASE DE TRANSITION

Comme le montre la figure 1, toutes les voies d'exposition devant être considérées en début de phase de transition post-accidentelle dépendent directement ou indirectement de la densité de dépôt (ou activité surfacique) initiale (Bq/m^2), issue du cumul des retombées radioactives lors de la dispersion du rejet accidentel. Par conséquent, l'évaluation prédictive des doses prévisionnelles pouvant être reçues au cours du premier mois, ainsi que de la contamination des denrées agricoles, nécessite la connaissance de l'activité surfacique initiale pour l'ensemble du territoire affecté par les retombées radioactives. Le GT « Hypothèses » a ainsi examiné les méthodes d'expertise en situation de crise permettant d'estimer rapidement la densité de dépôt, en utilisant des outils de modélisation et des informations environnementales disponibles au cours de l'accident ou immédiatement à la fin de celui-ci.

4.1. LES MÉTHODES DISPONIBLES POUR L'ÉVALUATION DES DÉPÔTS

Le rapport d'étape du GT3 de fin 2007 décrit en détail les phénomènes intervenant dans la formation des dépôts et les méthodes disponibles pour caractériser ces dépôts. Dans le cadre du GT « Hypothèses », ont été plus particulièrement examinées les méthodes qui permettent d'estimer les densités de dépôt dès la fin de la phase d'urgence, ainsi que les paramètres importants à considérer. En l'occurrence, la méthode de référence considérée consiste à modéliser la dispersion atmosphérique des substances radioactives rejetées, en considérant d'une part les caractéristiques des rejets au cours de l'accident et, d'autre part, les paramètres météorologiques. Les mesures de radioactivité disponibles au cours de la phase d'urgence permettent d'actualiser et de préciser les estimations par modélisation.

4.1.1. CONNAISSANCE DES CARACTÉRISTIQUES DES REJETS

Les caractéristiques importantes des rejets à considérer pour l'estimation des dépôts sont :

- les activités émises par radionucléide ;
- les formes physiques ou chimiques de ces radionucléides : état gazeux ou solides (aérosols), tailles des aérosols ;
- la cinétique des rejets.

En pratique, ces caractéristiques dépendent du type d'installation, du scénario d'accident, de l'état de confinement des matières radioactives... ; en situation d'accident, il est pratiquement impossible d'y accéder directement et les données utilisées pour caractériser les rejets proviennent essentiellement d'études préalables des accidents nucléaires et de modélisations effectuées en situation de crise à partir des informations techniques acquises sur l'installation accidentée. Lorsqu'elles sont disponibles, les mesures de l'activité des radionucléides dans l'air ou déposés au sol réalisées au cours de la phase

d'urgence peuvent aider à préciser la connaissance des rejets passés ; toutefois, tant que les rejets ne sont pas terminés, ces mesures ne permettent pas d'établir une connaissance fiable et définitive de la densité de dépôt initiale. **En tout état de cause, la quantification initiale des rejets radioactifs à partir de données indirectes peut se révéler très imprécise et il est recommandé une approche conservative.** En effet, l'estimation du « terme source » en situation accidentelle a une incidence très sensible sur l'évaluation des conséquences prévisionnelles à l'aide de modèles, concernant aussi bien la phase d'urgence que le début de la phase post-accidentelle. Les facteurs sensibles sur l'estimation de ce terme source en situation d'urgence, liés aux caractéristiques techniques des installations et aux matières mises en œuvre dans celles-ci, relèvent de l'analyse de sûreté et n'ont pas été examinés dans le cadre du GT « Hypothèses ».

4.1.2. DISPERSION ATMOSPHÉRIQUE DES SUBSTANCES RADIOACTIVES ET DÉPÔTS ASSOCIÉS

Les caractéristiques des dépôts formés à la fin du rejet accidentel dépendent directement des conditions de dispersion des substances radioactives dans l'air, elles-mêmes contrôlées par les conditions météorologiques.

En ce qui concerne les conditions météorologiques, les données proviennent soit des stations météorologiques locales, sur et autour du site concerné, installées par les exploitants nucléaires, soit des moyens d'observation et de prévision de Météo-France. Les données principales sont l'évolution des vents durant le rejet (directions, vitesses), la pluviométrie, la température et l'état de turbulence de l'atmosphère. En situation d'accident, les équipes d'expertises mobilisées (exploitant, IRSN, Météo-France) ont un accès régulier et partagé à ces différents paramètres acquis localement et, pour certains d'entre eux, aux données et prévisions de Météo-France. Il est important que la modélisation de la dispersion atmosphérique effectuée en situation de crise tienne compte de l'évolution des paramètres météorologiques au cours du temps, ainsi que de la dynamique des rejets radioactifs. Tant que les rejets se poursuivent, il convient de considérer également les prévisions météorologiques fournies par Météo-France, disponibles pour les 24 heures à venir. Toutefois, il est difficile de prévoir de manière précise, plusieurs heures à l'avance, la localisation et l'intensité des pluies (particulièrement en cas d'orages, correspondant en outre à des zones localisées de turbulence atmosphérique) qui sont des facteurs particulièrement sensibles dans la formation des dépôts. Dans le contexte de l'évaluation des conséquences post-accidentelles pour des rejets de relativement courte durée (moins de 24 heures), tels qu'étudiés dans les scénarios considérés jusqu'à présent par le CODIR-PA, cette difficulté est d'ordre secondaire.

La modélisation de la dispersion atmosphérique des radionucléides doit également tenir compte de la décroissance radioactive des radionucléides au cours de leur transport, ainsi que des éventuels produits de filiation formés. La prise en compte de ces phénomènes est importante pour les radionucléides à vie très brève ou pour le calcul des dépôts à grande distance du point de rejet, et bien sûr lorsque les rejets durent longtemps.

La formation des dépôts secs dépend directement de l'activité volumique des radionucléides dans l'air au niveau du sol et de la durée de présence de la contamination de l'air au dessus des surfaces au

sol. La modélisation des dépôts secs fait intervenir une vitesse de dépôt qui dépend essentiellement de la turbulence à proximité du sol (au sens de surface réceptrice) et de sa « rugosité », selon l'occupation du sol, qui est le paramètre de sensibilité prépondérant, susceptible d'induire une hétérogénéité spatiale à très petite échelle. Les vitesses de dépôt sec sont considérées comme constantes au cours du calcul, avec des valeurs typiques de 0,5 cm/s pour les gaz (hors gaz rares, considérés comme non déposables) et les aérosols, et de 0,1 cm/s pour l'iode organique. Ces valeurs sont probablement légèrement surestimées, ce qui a pour conséquence un risque de surestimation du dépôt à courte distance du point de rejet donc de l'appauvrissement du panache radioactif et de sous-estimation de la concentration résiduelle dans l'air en s'éloignant du point de rejet, le long de la trajectoire du panache radioactif.

La formation des dépôts humides résulte d'un phénomène d'entraînement des radionucléides présents dans le panache par de l'eau condensée, soit au sein du nuage, soit par précipitation. Son estimation repose sur l'utilisation d'un coefficient de lessivage dont la valeur typique (exprimée en s^{-1}) est de $10^{-4} \times I$ (où I est l'intensité de la pluie en mm/h) pour les aérosols et 100 fois moins pour l'iode organique. Le dépôt humide dépend notamment des caractéristiques des précipitations (durée, intensité, succession) ; cependant, le facteur de sensibilité le plus important est la position géographique des pluies. Par conséquent, la justesse de la prévision dépendra de la précision de la connaissance de l'endroit où il pleut. Lorsque l'expertise en situation de crise porte sur le pronostic des dépôts (c'est-à-dire la prévision des dépôts à venir), il est difficile d'obtenir une prévision satisfaisante du lieu, du moment et de l'intensité des pluies à venir, surtout en régime d'averses éparses ou orageuses ; en revanche, l'estimation des dépôts immédiatement après leur formation (mode « diagnostic ») peut être plus juste, dès lors que la localisation et l'intensité des précipitations sont connues. Cette dépendance à la localisation des zones de pluies entraîne une forte hétérogénéité spatiale à petite et grande échelle. Météo-France est en mesure de fournir des cartes des endroits où la pluie a effectivement eu lieu, environ 5 mn après l'épisode de pluie, grâce une méthode de détection par radar, avec une maille de 1 km $\times$ 1 km. Il s'agit de données importantes pour effectuer une estimation rapide de la localisation et de l'ordre de grandeur des dépôts humides en début de phase post-accidentelle, pouvant donner des résultats plus justes que ceux obtenus à l'aide d'évaluations prédictives réalisées lors de la phase de rejet.

4.2. RECOMMANDATIONS DU GROUPE DE TRAVAIL

- 1) L'évaluation prédictive des doses susceptibles d'être reçues au cours du mois suivant la fin de l'accident, ainsi que des niveaux de contamination des denrées agricoles, nécessite de disposer d'une cartographie de la densité de dépôt (ou activité surfacique) initiale dès la fin de la phase d'urgence. **Le GT « Hypothèses » estime qu'une telle cartographie ne peut pas être obtenue uniquement à l'aide de mesures, trop peu nombreuses au terme de la phase d'urgence et insuffisamment représentatives ; la reconstitution des dépôts radioactif en début de phase de transition post-accidentelle nécessite donc le recours à des outils de modélisation tenant compte des données relatives aux rejets radioactifs et des conditions météorologiques observées tout au long de la phase d'urgence.**

- 2) La modélisation des phénomènes de dispersion atmosphérique et de dépôts effectuée au terme des rejets accidentels donne des estimations de dépôts relativement satisfaisantes à l'échelle locale (quelques dizaines de kilomètres) mais plus imprécises à plus grande distance, en particulier concernant les dépôts humides. **Pour les reconstitutions des dépôts à grande échelle, il est recommandé de privilégier l'utilisation d'une modélisation empirique à partir de données environnementales (mesures ou estimations de la contamination de l'air, mesures des précipitations) plutôt qu'une modélisation directe du dépôt à partir du « terme source » des rejets accidentels.**
- 3) **Le GT « Hypothèses » souligne l'importance de bien connaître, dès la fin de la phase d'urgence, les lieux où il a plu pendant les rejets ainsi que les quantités cumulées d'eau de pluie.** En effet, cette connaissance permet d'identifier les parties du territoire où les dépôts risquent d'être plus élevés. Compte tenu de la recommandation précédente, cette connaissance est particulièrement utile pour les territoires distants du point de rejet, même si les dépôts résultant des pluies y sont en principe moins importants qu'à proximité de l'installation accidentée.
- 4) **Le GT « Hypothèses » attire l'attention sur le fait que la cartographie des densités de dépôts sur un territoire de taille importante est nécessairement imprécise en début de phase de transition post-accidentelle et ne peut pas être obtenue en recourant à une approche entièrement conservative.** En effet, la maximisation de certains paramètres de dépôts (par exemple la vitesse de dépôt sec) peut conduire à surestimer les conséquences sur certaines parties du territoire et, à l'inverse, à les sous-estimer sur d'autres parties de territoires. Ainsi, en dehors des paramètres de rejet qui peuvent être définis de façon conservative, la modélisation des dépôts au sol implique de recourir à des paramètres réalistes et à des observations des conditions environnementales réelles prévalant au moment de l'accident, notamment la météorologie.
- 5) Compte tenu de la forte variabilité locale des phénomènes influençant le dépôt, les estimations obtenues par modélisation en début de phase de transition post-accidentelle ne peuvent fournir que des valeurs indicatives moyennes des activités surfaciques, autour desquelles des écarts significatifs peuvent être ponctuellement observés en fonction des conditions locales spécifiques. **De tels écarts peuvent être particulièrement importants en milieu bâti (cf. § 2.3), ainsi que sur les territoires ayant reçu d'importants dépôts humides. C'est pourquoi les stratégies de mesure en début de phase post-accidentelle devraient privilégier la caractérisation de ces territoires où la connaissance initiale est imprécise et où les enjeux de protection sont importants.**

5. MÉTHODE D'EXPERTISE DES CONSÉQUENCES POST-ACCIDENTELLES

L'IRSN a une mission générale d'expertise en situation de crise nucléaire, en appui des pouvoirs publics, qui s'exerce aussi bien en phase d'urgence d'un accident nucléaire qu'au cours de la phase post-accidentelle². Comme cela est rappelé dans l'introduction du rapport, la mise en œuvre des premières actions de protection au début de la phase post-accidentelle nécessite de disposer rapidement d'une évaluation des conséquences dosimétriques et radiologiques prévisibles au cours du premier mois ; pour l'IRSN, cela implique de réaliser les premières évaluations dès la phase d'urgence puis de les affiner régulièrement au cours du temps. Pour mener ces évaluations, les principes généraux suivants sont proposés :

- l'évaluation des conséquences radiologiques et dosimétriques prévisionnelles devrait se faire selon un processus itératif de type diagnostic/pronostic, tel que cela est fait pour l'expertise menée pour la phase d'urgence ;
- l'évaluation devrait s'appuyer autant que possible sur des données contextuelles acquises pendant ou après l'accident ou, à défaut, utiliser des données choisies à partir des résultats des études, enquêtes, recherches générales ou locales menées avant l'accident. Toutefois, la recherche de données contextuelles spécifiques à l'accident ne doit pas conduire à retarder l'évaluation des conséquences, nécessaire à la décision rapide des actions de protection, même si cette évaluation peut sembler grossière et peu étayée sur des données observées ;
- les évaluations successives devraient fournir des résultats de moins en moins conservatifs et de plus en plus représentatifs de la réalité de la situation, grâce à la prise en compte des résultats de mesure de radioactivité et des données contextuelles propres à l'accident et à son environnement, qui devraient être de plus en plus nombreuses au cours du temps. Par conséquent, l'emprise des territoires où les valeurs repères servant à décider les actions de protection risquent d'être dépassées, devrait être revue à la baisse au fil du temps ; cette évolution ne préjuge pas des décisions qui seraient prises par les autorités de maintenir ou non le zonage initialement retenu pour la mise en place des premières actions de gestion post-accidentelles.

La déclinaison de ces principes dans une démarche d'expertise que pourrait suivre l'IRSN est décrite ci-après, sur un plan général et théorique, sans préjuger des mises au point pratiques et opérationnelles. Certains aspects de la méthode proposée dans ce chapitre nécessitent en effet des développements

² Pendant la phase d'urgence, l'exploitant de l'installation nucléaire accidentée réalise des expertises sur l'état de l'installation accidentée et sur les conséquences radiologiques des rejets en cours ou prévisibles, avec des outils et des moyens qui lui sont propres. Les résultats de ces expertises sont régulièrement confrontés avec ceux de l'IRSN. Dans le cadre du GT Hypothèses, la question de l'implication et des moyens techniques des exploitants nucléaires pour le calcul des conséquences post-accidentelles n'a pas été abordée. C'est pourquoi, dans le présent rapport, n'est traitée que la démarche d'expertise qui pourrait être suivie par l'IRSN ; toutefois, la présentation de cette démarche est suffisamment générale pour être transposable à d'autres organismes d'expertise.

avant d'envisager une mise en application opérationnelle dans la démarche d'expertise de crise de l'institut.

De plus, au cours de la phase de transition post-accidentelle, des parties prenantes locales ou nationales de plus en plus nombreuses seraient susceptibles d'intervenir dans le processus d'expertise des conséquences radiologiques et dosimétriques, grâce aux instances de concertation qui devraient progressivement être mises en place et au sein desquelles les orientations proposées dans le présent rapport pourraient être discutées et adaptées en liaison avec l'IRSN. Dans ce domaine, il convient de souligner le travail de réflexion en cours au sein de l'ANCLI (groupe permanent) sur la gestion post accidentelle autour des sites nucléaires.

Enfin, il faut rappeler que les conséquences prévisibles au cours du premier mois seraient estimées, lors des évaluations successives, sans tenir compte du bénéfice apporté par les actions de protection décidées par les pouvoirs publics. Toutefois, outre ces évaluations prédictives, l'IRSN aurait aussi à faire des reconstitutions de doses pour les personnes exposées, soit au cours de la phase d'urgence, soit au cours de leur présence sur les territoires contaminés après l'accident ; les résultats de ces reconstitutions de doses, menées de façon réaliste (donc tenant compte des éventuelles actions de protection) et avec des données contextuelles spécifiques, seraient nécessairement différents de ceux obtenus lors des évaluations prédictives. **Ces écarts ne doivent pas être perçus comme une incohérence des démarche d'expertise mais comme la conséquence d'objectifs différents : l'évaluation prédictive des conséquences radiologiques et dosimétriques a un objectif de prévention et de protection, alors que la reconstitution des doses sert à apprécier le risque sanitaire et à organiser le suivi sanitaire des populations exposées.**

5.1. PROPOSITION D'UNE MÉTHODE ITÉRATIVE D'ÉVALUATION DES DÉPÔTS RADIOACTIFS INITIAUX

Comme indiqué dans le chapitre 4, l'évaluation des conséquences prédictives au cours du premier mois suivant l'accident dépend directement de la connaissance du dépôt qui, au début de la phase de transition post-accidentelle, reposerait principalement sur des résultats de modélisation de la dispersion des rejets dans l'atmosphère et un nombre vraisemblablement limité de résultats de mesure de la radioactivité dans l'environnement.

5.1.1. DIAGNOSTIC/PRONOSTIC DU DÉPÔT AU COURS DE LA PHASE D'URGENCE

La phase d'urgence d'un accident nucléaire correspond soit à une situation de menace de rejet, soit à une situation où des rejets sont en train de se produire et vont se poursuivre jusqu'à la maîtrise de l'accident (rétablissement d'un état de sûreté jugé satisfaisant, ne présentant plus de risque de survenue de rejets supplémentaires).

5.1.1.1. Définitions du diagnostic et du pronostic du dépôt

Le diagnostic du dépôt à l'instant T_i correspond à l'évaluation et à la représentation (cartographique, graphique ou tabulée) des retombées radioactives au sol cumulées depuis le début du rejet (T_0) jusqu'au moment où le diagnostic est réalisé (T_i). Lorsque des rejets sont en cours, le diagnostic évolue

au cours du temps et ne peut être figé. En pratique, il ne peut être établi qu'à l'aide d'outils numériques modélisant la dispersion atmosphérique des rejets et les retombées atmosphériques associées, nécessitant de connaître :

- le cumul des rejets entre T_0 et T_i et, si possible, la cinétique de rejet (variation du débit de rejet) sur la même période ; cette connaissance provient habituellement de l'interprétation des données techniques de l'installation accidentée, transmises par l'exploitant, et il existe rarement de mesure directe des rejets ;
- les conditions météorologiques (*a minima* la direction, la vitesse du vent, l'intensité des pluies et les conditions de stabilité atmosphérique) enregistrées au voisinage du site entre T_0 et T_i ; ces données sont acquises par les stations météorologiques locales ou régionales et l'IRSN y a habituellement accès, soit par l'exploitant, soit par Météo-France.

La figure 15 illustre comment évoluerait le diagnostic du dépôt au cours du temps, pour un scénario d'accident de fusion du cœur d'un réacteur à eau pressurisée, en fonction des rejets émis au cours des premières 24 heures.



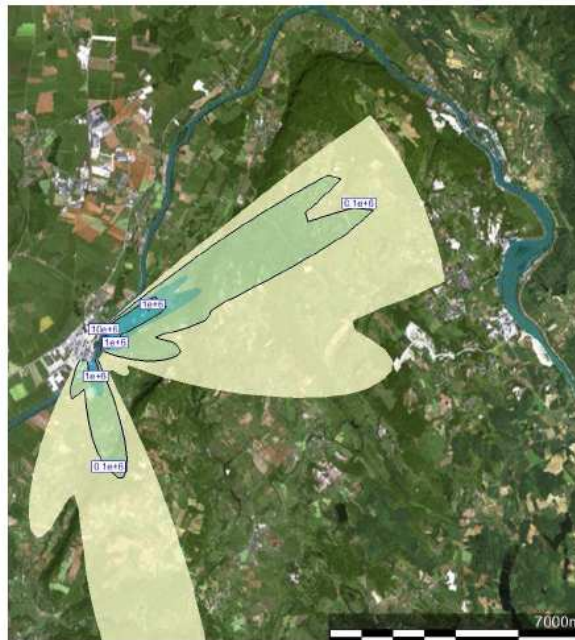
T₀ + 3 heures



T₀ + 6 heures



T₀ + 12 heures



T₀ + 24 heures

Figure 15 - Cartographie des dépôts d'iode 131 obtenue à partir du diagnostic des dépôts cumulés depuis le début des rejets (T₀) jusqu'au moment où le diagnostic est établi (3 heures, 6 heures, 12 heures et 24 heures après le début des rejets). Le scénario considéré est un accident de fusion du cœur d'un réacteur à eau pressurisée de 900 MWe (EAS hors service) et les conditions météorologiques sont celles observées par Météo-France sur une journée complète (le 3 janvier 2003 sur le site de la Hague et transposées au site du CNPE du Bugey), présentant des changements de la direction du vent.

Le pronostic du dépôt consiste à estimer les dépôts futurs à partir de l'instant T_i , sur une période ΔT qui peut correspondre soit au terme prévisible des rejets si celui-ci est proche (quelques heures), soit aux 24 heures à venir, soit à une durée plus longue selon les capacités de prévision des rejets et des conditions météorologiques futurs. L'établissement du pronostic des dépôts suppose que soient connues :

- 1) les prévisions de rejets à venir, cumulés sur la période de calcul du pronostic, si possible avec la cinétique de rejet (variation du débit de rejet) ;
- 2) les prévisions météorologiques (*a minima* la direction et la vitesse du vent, les hauteurs de pluie et les conditions de stabilité atmosphérique) sur la même période.

L'incertitude ou la connaissance partielle de la durée des rejets et des conditions météorologiques ne permet pas facilement d'estimer les retombées futures sur l'ensemble du territoire. La pratique actuelle au centre technique de crise de l'IRSN consiste à ne calculer les dépôts que dans l'axe principal du vent, en supposant que celui-ci reste constant sur la période ΔT considérée, en appliquant un coefficient de battement permettant de tenir compte d'une fluctuation possible de la direction du vent autour de cette direction principale, au cours de cette période ; les valeurs ainsi calculées dans l'axe principal du vent en fonction de la distance du point de rejet sont alors transposées à équidistance du point de rejet, sur un secteur angulaire sous le vent (Figure 16).

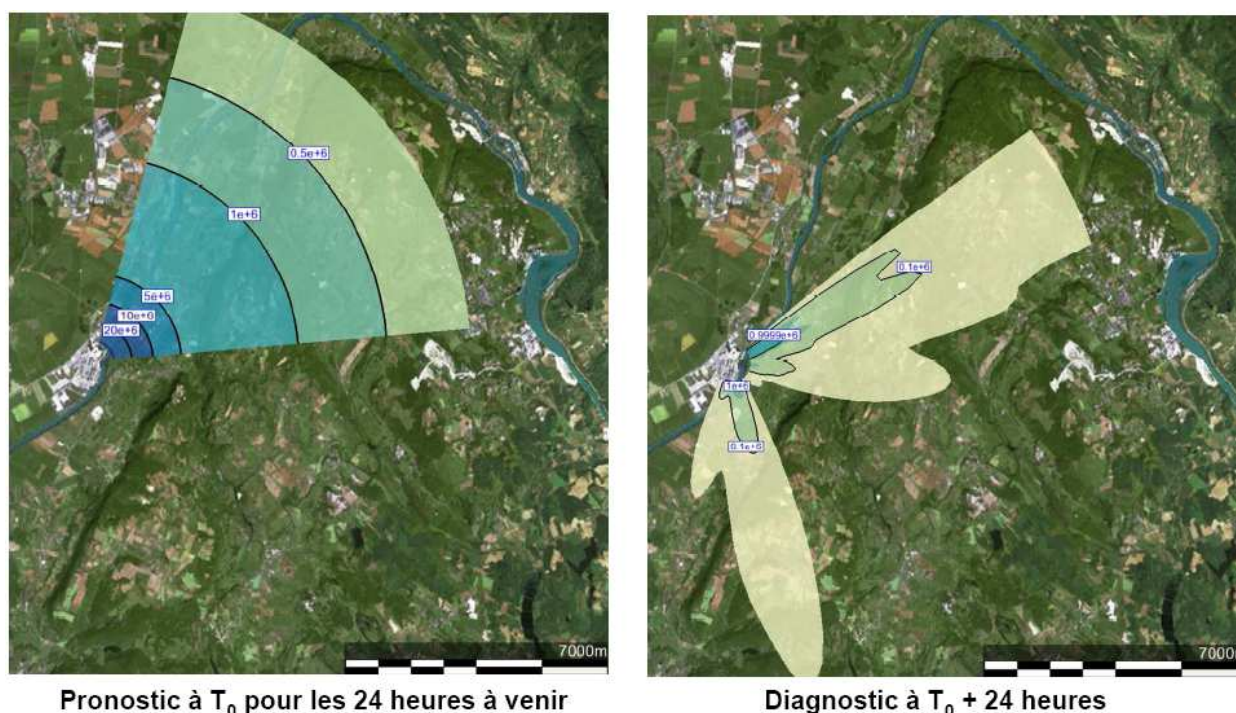


Figure 16 - Comparaison des cartes des dépôts d'iode 131 obtenues : à gauche, à partir du pronostic à 24 heures établi au début des rejets (T_0) ; à droite, à partir du diagnostic des dépôts cumulés 24 heures après le début des rejets (voir figure 15). Pour le pronostic, il a été pris en compte une direction de vent dominant au cours de la journée considérée, avec une vitesse moyenne de 5 m/s (diffusion faible).

Cet exemple montre des écarts importants entre l'estimation pronostiquée et le diagnostic fait 24 heures plus tard ; le pronostic réalisé selon cette méthode tend à surestimer significativement les

dépôts sous le vent dominant prévisionnel, ainsi que sur les territoires situés dans le secteur angulaire de part et d'autre de cette direction ; à l'inverse, il ne permet pas d'identifier des dépôts, certes de plus faible importance, induits par des changements épisodiques de la direction du vent.

5.1.1.2. Diagnostics et pronostics réalisés pendant la phase d'urgence

Le schéma de la figure 17 illustre trois types de scénarios d'accident pour lesquels l'engagement d'un diagnostic des dépôts, éventuellement complété par un pronostic, pourrait se faire à des moments différents. Ces différentes situations appellent les commentaires suivants.

Au cours d'une situation de menace, il n'y a pas lieu de faire de diagnostic des dépôts et l'intérêt de faire un pronostic des dépôts futurs semble généralement limité, sauf si l'évolution prévisible de l'accident conduit à des rejets à court terme et sur une courte durée (quelques heures au plus).

Lorsque des rejets radioactifs sont en cours, il n'est pas possible d'établir un diagnostic « figé » du dépôt car les rejets à venir vont contribuer à faire évoluer ce dépôt. Selon la cinétique des rejets, il peut néanmoins se révéler utile d'établir un diagnostic intermédiaire des dépôts au cours de la phase d'urgence, et éventuellement un pronostic des dépôts à venir en fonction des prévisions de rejets radioactifs et des prévisions météorologiques, en adaptant la démarche selon les cas de figure suivants :

- **pour des accidents à cinétique rapide avec des rejets de courte durée** (exemple du scénario « RTGV » étudié par le CODIR-PA - Cas 1 de la figure 17), compte tenu des délais de mobilisation de l'organisation de crise, il est vraisemblable que le premier diagnostic serait élaboré après la fin des rejets, selon l'approche présentée au paragraphe 5.1.2 ;
- **pour des accidents dont les rejets durent moins de 24 heures**, il serait utile de faire spécifiquement un diagnostic intermédiaire des dépôts formés depuis le début des rejets, éventuellement actualisé plusieurs fois, afin d'aider à l'interprétation des résultats de mesure obtenus sur le terrain (cas 2 de la figure 17), mais ce diagnostic ne devrait pas se faire au détriment des évaluations (diagnostic ou pronostic) des doses dues à l'exposition au panache au cours de la phase d'urgence, indispensable à la décision rapide des actions de protection d'urgence. C'est pourquoi il n'est pas recommandé de faire un tel diagnostic dans les premières heures de la phase de rejet. Par ailleurs, ce diagnostic intermédiaire n'a aucun intérêt pratique en termes de décision concernant les actions de protection en phase post-accidentelles, car les emprises territoriales impactées par les retombées radioactives ne sont pas figées ;
- **pour des accidents dont les rejets durent plusieurs jours** (cas 3 de la figure 17, non encore étudié par le CODIR-PA), il est vraisemblable que les calculs des doses prévisionnelles pouvant être reçues au cours du mois à venir et de la contamination des denrées agricoles devraient être faits dès le second jour, même si les dépôts ne sont pas encore stabilisés. Dans ces conditions, il conviendrait de mettre en place une démarche itérative de diagnostic et de pronostic des dépôts, si possible avant la fin de la première journée de l'accident et se prolongeant les jours suivants.

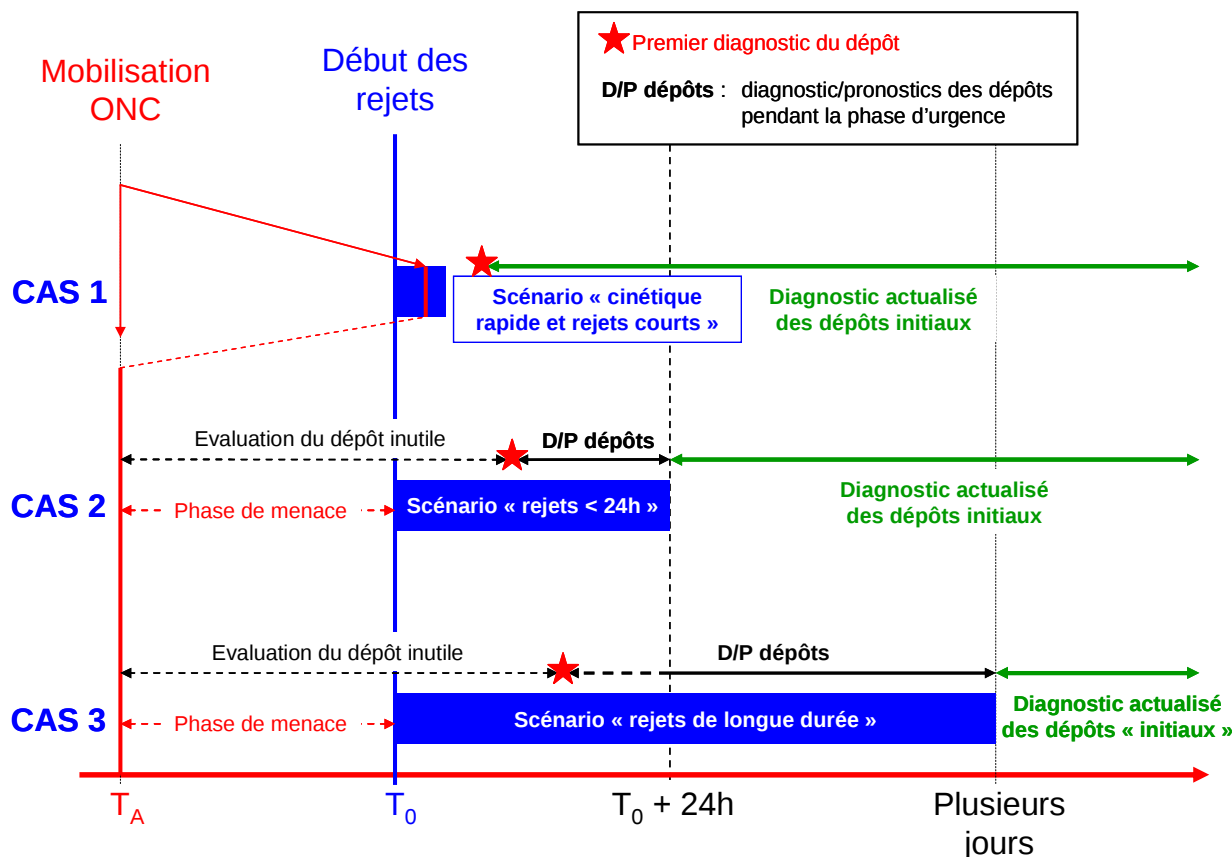


Figure 17 - Engagement d'un diagnostic ou d'un pronostic des dépôts initiaux (dépôts cumulés au terme des rejets) pour différents cas de scénarios accidentels. Le diagnostic porte sur les rejets cumulés depuis le début des rejets ; le pronostic porte sur la prévision de dépôts cumulés depuis le début des rejets jusqu'à une échéance future donnée. Après l'établissement d'un premier diagnostic ou pronostic, une actualisation est faite périodiquement en fonction des données nouvelles acquises sur l'accident et dans l'environnement.

5.1.1.3. Actualisation itérative du diagnostic et du pronostic

Lorsque les rejets durent suffisamment longtemps (de l'ordre de 24 heures ou plus), le diagnostic et le pronostic devraient être actualisés par itérations, en fonction des données nouvelles acquises sur l'accident et les conditions de dispersion dans l'environnement.

En s'approchant du terme de l'accident, marqué par la fin des rejets significatifs, le diagnostic du dépôt tendrait à se stabiliser et le pronostic incluant les dépôts futurs ne devrait plus conduire à des modifications importantes de l'estimation globale des dépôts. Ainsi, cette approche itérative devrait en théorie permettre d'obtenir une cartographie des dépôts représentative de la meilleure connaissance disponible pour évaluer les conséquences post-accidentelles au cours du premier mois suivant la fin de l'accident, ainsi que les indicateurs d'intérêt aidant à définir la zone de protection des population et la zone de surveillance renforcée des territoires.

Il convient toutefois de souligner les facteurs d'incertitude qui peuvent affecter le diagnostic des dépôts au terme des rejets, en dehors de ceux concernant le terme source qui peuvent également induire une forte imprécision (cf. § 4.1.1). Ainsi, au cours de la phase d'urgence, afin de limiter le temps de calcul, la modélisation de la dispersion atmosphérique à courte distance (une trentaine de kilomètres autour du site) estime les dépôts humides en utilisant une valeur uniforme de hauteur de

pluie sur l'ensemble du territoire considéré ; dans ces conditions, en cas de pluie variable sur ce territoire, des écarts seraient nécessairement observés entre l'estimation du dépôt et le dépôt réel, mais l'erreur induite à cette échelle devrait être relativement faible.

En revanche, pour des territoires à plus grandes distances (de l'ordre d'une centaine de kilomètres ou plus), il est important de tenir compte de la variation spatiale et temporelle des pluies pour l'estimation des dépôts par modélisation (voir § 4.2, recommandation n°3) ; toutefois, comme le soulignent les recommandations n°4 et 5 du paragraphe 4.2 du présent rapport, la reconstitution des dépôts sur de vastes territoires à l'aide de modèles de dispersion atmosphérique peut s'avérer très imprécise lors des premières estimations et, pour certains territoires localisés, peut donner des résultats sous-évalués. Selon les principes généraux de l'expertise des conséquences post-accidentelles proposés ci-dessus, l'imprécision des premières estimations devrait progressivement être réduite au fur et à mesure de l'actualisation du diagnostic (voir § 5.1.1.3).

Dans ce contexte d'imprécision, il importe de limiter le risque de sous-estimation des dépôts pour les territoires les plus proches du site accidenté (quelques dizaines de kilomètres), c'est-à-dire là où pourraient être rencontrées des situations à fort enjeu de radioprotection à court terme, et il semble acceptable d'admettre une éventuelle sous-estimation des premières évaluations de conséquences pour des territoires plus lointains, où les enjeux de radioprotection sont moins immédiats, et de faire en sorte que les évaluations ultérieures corrigent ces éventuelles sous-estimations.

Pour ce qui concerne le pronostic des dépôts, l'exemple fourni à la figure 16 en montre les limites dans l'état actuel des pratiques. Toutefois, l'établissement d'un pronostic des dépôts, périodiquement actualisé, pourrait être utile pour anticiper les premières actions de protection vis-à-vis des retombées au sol, dans le contexte d'un rejet de plusieurs jours ; la démarche d'évaluation des conséquences radiologiques et dosimétriques dans une telle situation, non encore étudiée par le CODIR-PA, nécessiterait un travail de mise au point plus approfondie. Dans le cas d'un rejet de courte durée (moins de 24 heures) précédé d'une phase de menace (cas 2 de la figure 17), l'établissement d'un pronostic, même imprécis, pourrait avoir un intérêt pour anticiper la mise en place d'actions préventives touchant certaines activités agricoles (protection du bétail, des fourrages, des silos) qui pourraient être directement affectées par les dépôts.

5.1.2. ACTUALISATION DU DIAGNOSTIC DES DÉPÔTS APRÈS LA FIN DES REJETS

5.1.2.1. Estimation du cumul des dépôts à la fin des rejets

Pour le calcul des indicateurs radiologiques ou dosimétriques servant à décider, en début de phase de transition, l'emprise de la zone de protection de la population ou de zone de surveillance renforcée des territoires, il est nécessaire de considérer **les dépôts cumulés à l'issue des rejets (appelés aussi « dépôts initiaux » dans le présent rapport), exprimés en termes de densité d'activité déposée par unité de surface (Bq/m^2)**, indépendamment de leur évolution ultérieure (pour mémoire, voir le schéma de la figure 1).

Après la fin des rejets, les dépôts initiaux sont stabilisés, dans le sens où il ne se forme plus de nouveaux dépôts, et la démarche d'expertise devrait alors consister à préciser le diagnostic de ces

dépôts initiaux à l'aide d'un travail de reconstitution des rejets radioactifs et en exploitant les résultats de mesure disponibles. Il est important de souligner que ne seraient pris en compte ici que les résultats de mesure effectivement interprétables pour le diagnostic des dépôts initiaux, ce qui implique de tenir compte de la décroissance radioactive ou d'éventuels phénomènes de migration ou de dilution des radionucléides au moment où les prélèvements et les mesures sont réalisés.

On peut supposer qu'au cours de la première semaine suivant la fin de l'accident, l'actualisation du diagnostic des dépôts initiaux se ferait à une fréquence quotidienne, en fonction des données nouvelles acquises dans l'environnement (résultats de mesure) ; par la suite, les mises à jour devraient être moins fréquentes, en fonction des nouveaux résultats, et ne devraient pas conduire à remettre fondamentalement en question la reconstitution des dépôts initiaux.

5.1.2.2. Cartographie des dépôts effectifs à une date donnée

Outre la connaissance des retombées radioactives initiales, nécessaire à l'évaluation prédictive des conséquences radiologiques et dosimétriques au cours du premier mois suivant la fin des rejets, il serait nécessaire de disposer, à l'état de diagnostic ou de pronostic, d'une cartographie des dépôts effectifs, correspondant aux dépôts rémanents à un moment donné (par exemple une semaine après la fin de l'accident). Ainsi, les dépôts effectifs à un jour donné seraient le résultat de l'évolution des dépôts initiaux au cours des jours et semaines suivant l'accident, compte tenu de leur « vieillissement » sous l'effet de la décroissance radioactive, des phénomènes de migration des radionucléides (notamment le transport « instantané » qui peut se produire pour les dépôts humides, par le ruissellement de l'eau) ou encore du fait des éventuelles actions de nettoyage de surfaces ou de retrait de terres contaminées.

Cette cartographie peut être obtenue de diverses manières :

- à partir de la carte des dépôts initiaux, en tenant compte de la décroissance radioactive des radionucléides composant les dépôts ; cette approche permet de pronostiquer l'évolution des dépôts jour après jour et peut fournir une aide aux équipes d'intervention, notamment pour la réalisation de mesures ; par contre, elle est sujette aux mêmes imprécisions que la cartographie des dépôts initiaux et ne permet pas de rendre compte de la variabilité locale des dépôts ni des phénomènes de migration des radionucléides après le dépôt ;
- à partir des campagnes de mesure sur le terrain (HELINUC, spectrométrie gamma), en prenant les précautions nécessaires pour « synchroniser » les résultats si ceux-ci sont obtenus sur plusieurs jours. Cette approche permet de mieux rendre compte de la variabilité locale des dépôts et des effets dus aux phénomènes de migration des radionucléides ou aux actions de nettoyage.

Cette cartographie complémentaire aurait un intérêt, d'une part à des fins opérationnelles, d'autre part pour supporter les discussions avec les parties prenantes ; une attention particulière devrait être portée sur la communication autour de ces différents types de cartes, afin d'éviter toute confusion ou polémique inutile.

5.2. ÉVALUATION ITÉRATIVE DES DOSES PRÉVISIONNELLES ET DE LA CONTAMINATION DES DENRÉES AGRICOLES

Outre le fait que le diagnostic du dépôt initial peut évoluer au cours du temps, comme cela a été vu précédemment, les données contextuelles utilisées pour les calculs de doses ou de contamination ont une grande influence sur les résultats et leur choix peut aussi évoluer au cours du temps. En l'occurrence, les hypothèses « raisonnablement prudentes », au sens défini dans l'introduction de ce rapport, utilisées lors des premières évaluations devraient être progressivement remplacées par des données acquises pendant ou à la suite de l'accident, spécifiques au contexte de celui-ci.

5.2.1. PRINCIPALES DONNÉES CONTEXTUELLES POUR L'ÉVALUATION DES DÉPÔTS INITIAUX ET DU DÉBIT DE DOSE AMBIANT

5.2.1.1. Lors des premières évaluations

Les données contextuelles acquises lors de l'accident sont de deux types (cf. § 4.1) :

- données techniques sur l'accident (paramètres mesurés dans l'installation) permettant d'estimer les caractéristiques principales des rejets (radionucléides ; activités rejetées ; formes physico-chimiques) provoqués par l'accident, en les interprétant à l'aide de connaissances et d'outils établies à partir des études sur les accidents graves et des analyses de sûreté ;
- données météorologiques fournies par l'exploitant et Météo France, venant des systèmes d'observation disponibles et des outils de prévision.

Les autres données utilisées pour le calcul des dépôts sont fixées par hypothèse et, de ce fait, ne tiennent pas compte des spécificités de l'accident et de l'environnement de l'installation. C'est le cas en particulier de la hauteur des rejets, de la vitesse de dépôt sec et du coefficient de lessivage pour le calcul des dépôts humides.

La conversion des résultats de densité de dépôt en débit de dose ambiant est faite en considérant une distribution superficielle des radionucléides sur une surface plane horizontale de dimension infinie et en tenant compte uniquement de la décroissance radioactive des radionucléides constitutifs des dépôts (voir recommandation n° 1 du § 2.3.3) ; les facteurs de dose (conversion de la densité de dépôt en débit de dose ambiant) utilisés sont ceux proposés par les bases de données techniques les plus à jour et ne devraient pas être influencés par le contexte de l'accident.

5.2.1.2. Prise en compte progressive de nouvelles données acquises lors de l'accident ou après

Des mesures pertinentes de dépôt ou de débit de dose pourraient servir à réévaluer certains paramètres contextuels qui avaient été retenus lors des estimations antérieures, en particuliers ceux qui avaient été fixés *a priori*, par hypothèses :

- la nature et l'activité des radionucléides rejetés lors de l'accident (réévaluation du « terme source ») ;

- la forme physico-chimique de certains radionucléides (cas de l'iode en particulier) ;
- la vitesse de dépôt sec : réévaluation possible à partir de la reconstitution de la contamination de l'air et des mesures de dépôts ; modulation des valeurs en fonction des catégories de surface (prairie, forêt, cultures, milieu urbain...) ;
- le coefficient de lessivage : réévaluation possible à partir de données sur la contamination de l'air, des mesures de dépôts, des mesures de radioactivité dans l'eau de pluie ou de données météorologiques plus précises que celles utilisées lors des estimations antérieures ;
- la cartographie des débits de dose ambiants, notamment en milieu urbain et dans les forêts : les estimations de débit de dose découlant des calculs de densité de dépôt devraient être progressivement remplacées par des mesures du débit de dose ambiant, donnant ainsi une représentation plus réaliste des conditions d'ambiance. La prise en compte de la composition du dépôt et de la décroissance radioactive des radionucléides présents devrait permettre de simuler, de manière réaliste, l'évolution du débit de dose ambiant au cours du premier mois et, en conséquence, de préciser l'évaluation des doses prévisionnelles dues à l'irradiation externe venant du dépôt au cours de cette même période.

Le schéma proposé à la figure 18 récapitule la démarche d'évaluation des dépôts radioactifs et d'actualisation de cette évaluation en fonction des données acquises après l'accident.

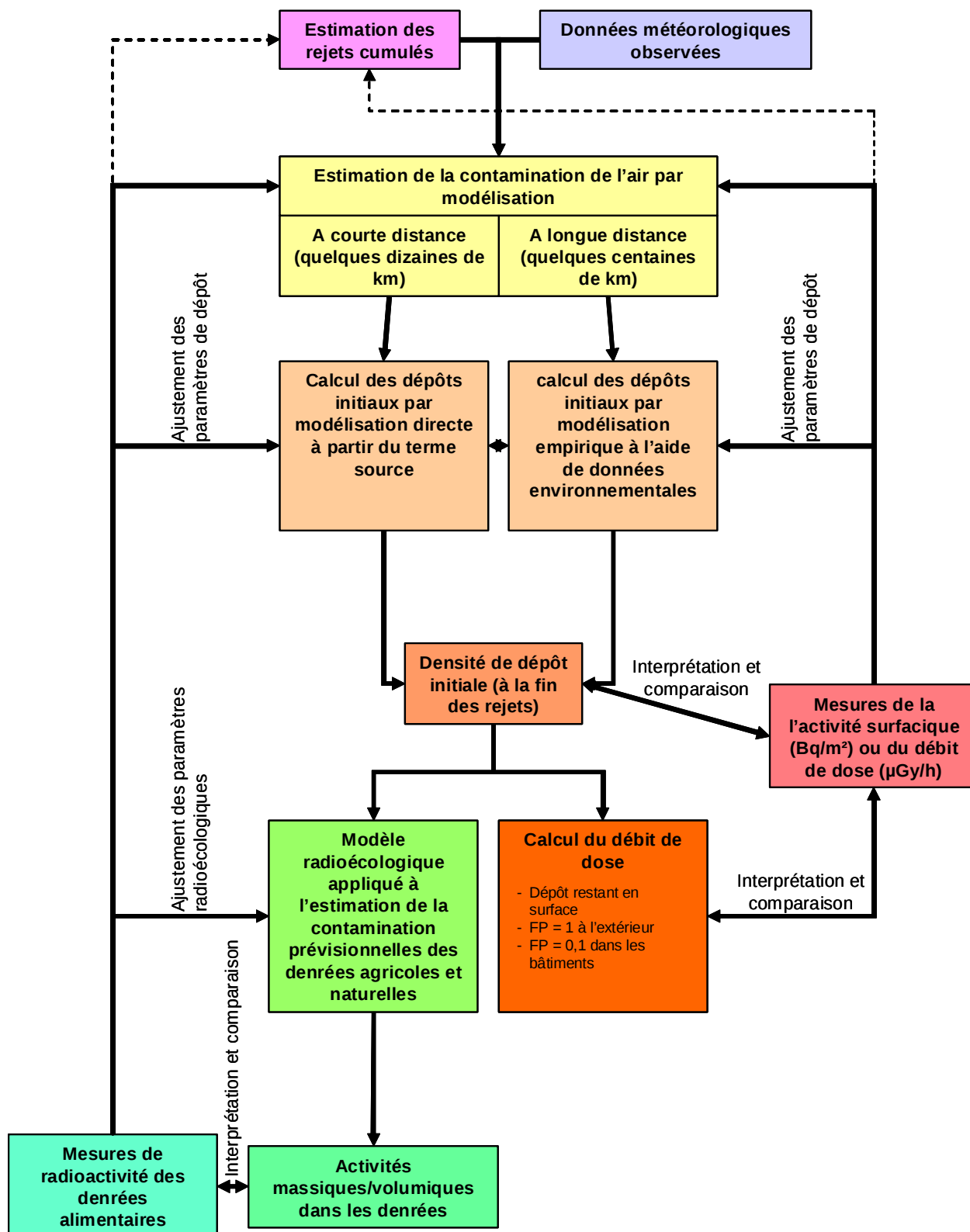


Figure 18 - Schéma récapitulatif de la démarche de reconstitution des dépôts radioactifs au début de la phase de transition post-accidentelle, avec une actualisation intégrant les résultats de mesure de radioactivité dans les denrées agricoles et de débit de dose.

5.2.2. PRINCIPALES DONNÉES CONTEXTUELLES POUR L'ÉVALUATION PRÉDICTIVE DE LA CONTAMINATION DES DENRÉES AGRICOLES ET NATURELLES

5.2.2.1. Lors des premières évaluations

Les données contextuelles accessibles lors des premières évaluations sont principalement liées à la date de l'accident et, en conséquence, l'état de développement des végétaux estimé à partir de données standards connues avant l'accident (valeurs définies par défaut pour le calendrier cultural et le calendrier d'affouragement).

A ce stade, comme le propose la recommandation n°1 du paragraphe 3.2, **l'effort d'expertise doit en priorité porter sur les denrées susceptibles d'être récoltées puis consommées dans le mois qui suit la fin de l'accident. Dans un premier temps, l'estimation devrait concerner toutes les catégories génériques de denrées (légumes feuilles, légumes fruits, légumes racines, fruits, lait de vache, viande) sans attendre de savoir quel type et quelle quantité de denrées appartenant à ces diverses catégories sont effectivement présents sur les territoires impactés par les retombées radioactives.** En l'absence d'information sur le contexte local au moment de l'accident, il devrait être supposé que les denrées considérées sont susceptibles d'être trouvées en tout lieu du territoire impacté et que leur récolte ou production débute dès le lendemain de l'accident et se poursuit les jours suivants. Cette approche est conservatrice dans le sens où, toutes choses égales par ailleurs, elle conduit à maximiser les doses par ingestion de denrées d'origine locale et l'étendue des territoires où un dépassement des NMA risque d'être observé.

Les caractéristiques des dépôts initiaux à l'origine de la contamination des denrées agricoles ou naturelles sont celles obtenues à l'aide de la démarche décrite au paragraphe 5.2.1. Considérant les préconisations du paragraphe 3.2.1, les hypothèses suivantes devraient être retenues pour les premiers calculs de la contamination des denrées :

- pour les végétaux destinés à la consommation humaine ou animale, il n'est pris en compte que la contamination par transfert foliaire, le transfert racinaire étant négligeable au cours du premier mois ;
- il n'est pas tenu compte de l'effet protecteur des serres ;
- si des dépôts humides se sont formés avec plus de 5 mm de pluie, il convient d'en tenir compte spécifiquement dans le calcul de la contamination des végétaux de manière à ne pas surestimer cette contamination de manière injustifiée ; si ces dépôts se sont formés avec de faibles pluies, ils peuvent être assimilés à un dépôt sec.

5.2.2.2. Prise en compte progressive de nouvelles données acquises lors de l'accident ou après

Dès que possible, avant la fin de l'accident si celui-ci dure suffisamment longtemps (24 h ou plus) ou dans les premiers jours de la phase de transition post-accidentelle, il conviendrait de disposer d'informations sur la situation réelle des cultures et de l'élevage sur les territoires considérés, principalement :

- la nature et la localisation des productions alimentaires, et si possible les quantités susceptibles d'être récoltées au cours du temps ;
- la réalité du calendrier cultural et du calendrier d'affouragement au moment de l'accident ;
- certains paramètres agronomiques ou d'élevage (rendement de croissance, mode d'alimentation du bétail, etc.) ;
- l'existence de denrées jugées particulièrement sensibles à la contamination radioactive (lait de chèvre ou de brebis notamment, ou préparation culinaire spécifique) ;
- des informations sur les pratiques locales de chasse, pêche et cueillette ;
- des informations sur le mode de transformation et de consommation des denrées d'origine locale (part consommée localement à l'état frais, part consommée localement à l'état de conserve, part transformée par l'industrie agroalimentaire et exportée sur d'autres territoires).

Dans le cadre de l'expertise que l'IRSN devrait mener dans de telles circonstances, il est important que des échanges réguliers avec les services du ministère de l'agriculture s'instaurent rapidement afin de disposer dès que possible de ce type d'information.

De même, les résultats de mesure de la contamination des denrées agricoles et d'élevage, associés aux informations contextuelles sur les prélèvements des échantillons et sur les mesures effectuées, devraient permettre d'ajuster la modélisation prédictive de la contamination des denrées, y compris concernant l'estimation des dépôts initiaux à l'origine de la contamination des denrées.

Cette réévaluation, allant dans le sens d'une estimation plus réaliste de la contamination prévisible des denrées d'intérêt dans le contexte de l'accident, accompagnée d'une réévaluation concomitante des dépôts (cf. § 5.2.1), pourrait conduire à réduire l'étendue des territoires où sont susceptibles d'être dépassées les valeurs guides proposées pour définir les zones de protection des populations et de surveillance renforcée des territoires. Comme pour les dépôts, la fréquence de mise à jour de l'estimation des conséquences prévisionnelles sur les denrées agricoles et naturelles pourrait se faire sur une base quotidienne au cours de la première semaine, en fonction des données nouvelles acquises, et sur un rythme plus lent par la suite.

Avant le terme du premier mois suivant l'accident, il conviendrait d'évaluer, en complément, les conséquences sur les denrées qui continueraient d'être récoltées ou produites au cours des mois suivants, y compris celles qui n'avaient pas lieu d'être considérées pour le premier mois. Ces évaluations complémentaires, menées au cours du premier mois, devraient se reposer sur une estimation aussi réaliste que possible des dépôts et des pratiques agricoles et d'élevage. Elles serviraient à éclairer les autorités sur la prolongation éventuelle, au-delà du premier mois, des zones de protection des populations et de surveillance renforcée des territoires, en adaptant le cas échéant l'emprise de ces zones.

5.2.3. PRINCIPALES DONNÉES CONTEXTUELLES POUR L'ÉVALUATION PRÉDICTIVE DES DOSES REÇUES PAR LES POPULATIONS AU COURS DU 1^{ER} MOIS

L'évaluation prédictive des doses susceptibles d'être reçues au cours du premier mois après la fin de l'accident par les populations demeurant sur les territoires contaminés, en supposant l'absence d'action de protection, dépend non seulement de l'estimation des dépôts et de la contamination des denrées alimentaires, évoquée précédemment, mais aussi des paramètres de mode de vie et d'alimentation des populations considérées, tels qu'indiqués aux paragraphes 2.2 et 2.3.

5.2.3.1. Doses dues à l'irradiation externe

- **Données initiales retenues par hypothèse pour les premières évaluations**

Les premiers calculs des doses prévisionnelles dues à l'irradiation externe venant du dépôt devraient être réalisés selon les hypothèses suivantes :

- les débits de doses pris en compte dans l'estimation sont ceux déduits de l'évaluation des dépôts initiaux menée selon la démarche décrite au paragraphe 5.2.1, en tenant compte de la décroissance radioactive et des éventuelles mesures de débit de dose ambiant disponibles au moment de l'évaluation ;
- le calcul est fait pour une personne qui demeure en permanence sur le lieu considéré, c'est-à-dire sans déplacement à l'intérieur du territoire contaminé ni à l'extérieur de celui-ci ;
- il est supposé que le temps de présence dans l'environnement extérieur peut atteindre 50%, le reste du temps étant passé à l'intérieur de bâtiments offrant un facteur de protection de 0,1 (voir recommandation n°4 du § 2.3.3).

Les évaluations de doses reposant sur ces hypothèses devraient être conservatives pour la plupart des personnes pouvant exercer une activité normale et diversifiée sur les territoires considérés, mais ne s'appliquent pas au cas particulier des personnes qui séjourneraient durablement dans des abris de petite taille en matériaux légers, tels que les caravanes, mobil homes, etc., pour lesquelles une gestion spécifique devrait être mise en place à l'intérieure de la zone de protection des populations. Par ailleurs, il ne paraît pas souhaitable de retenir un facteur de position supérieur à 1, car il en résulterait des surestimations peu justifiées dans la mesure où les autorités adopteraient probablement des restrictions pour limiter la fréquentation des lieux où ce facteur de position pourrait être supérieur à 1, comme dans les forêts et les jardins publics (voir GT1).

- **Prises en compte de nouvelles données pour les évaluations suivantes**

Dans le contexte du début de la phase de transition, plusieurs circonstances pourraient conduire à faire évoluer les hypothèses retenues sur le mode de vie des personnes exposées par irradiation externe :

- les résultats de campagnes de mesure de débit de dose ambiant devraient se substituer progressivement aux valeurs déduites de l'évaluation des dépôts initiaux à l'aide de modèles (voir § 5.2.1) ;

- en concertation avec les autorités et si possible les parties prenantes locales, des estimations reposant sur des hypothèses plus réalistes pourraient être menées, principalement en ajustant le taux de présence à l'extérieur des bâtiments en fonction des pratiques décrites (sans descendre en dessous de 20%).

5.2.3.2. Doses dues à l'ingestion involontaire de particules radioactives

• Données initiales retenues par hypothèse pour les premières évaluations

En application des recommandations du § 2.4.2, les premières évaluations des doses prévisionnelles reçues au cours du premier mois dans le cas d'un rejet accidentel de produits radioactifs venant d'un réacteur (présence de radionucléides émetteurs gamma) devraient être réalisées selon les hypothèses suivantes :

- l'activité surfacique prise en compte est le dépôt initial tel que calculé selon la démarche présentée au § 5.2.1, en tenant compte de la décroissance radioactive des radionucléides à vie courte et en supposant que ce dépôt reste entièrement en surface, qu'il demeure entièrement labile et que le dépôt à l'intérieur des habitations est égal à $1/10^{\text{ième}}$ de celui à l'extérieur ;
- l'estimation est faite, soit pour un adulte, avec les paramètres disponibles dans les bases techniques les plus à jours, en considérant un budget espace-temps identique à celui retenu pour le calcul des doses dues à l'irradiation externe (voir § 5.2.3.1), soit pour un jeune enfant (1 an) en considérant qu'il passe moins de 20% de son temps à l'extérieur ; dans ce second cas, le calcul de l'irradiation externe devrait également être fait en retenant la même hypothèse sur le temps de présence à l'extérieur.

En pratique, c'est la somme des doses calculées pour l'irradiation externe (§ 5.2.3.1) et pour l'ingestion involontaire qui devrait aider à définir la zone éloignement immédiat des populations résidant sur les territoires les plus contaminés de la zone de protection des populations.

Dans le cas de rejets accidentels n'impliquant que des radionucléides émetteurs alpha, il convient d'éviter de faire des évaluations prédictives de doses dues à l'ingestion involontaire uniquement à partir d'une modélisation et d'attendre de disposer de cartographies des dépôts labiles établies à l'aide de mesures (après d'éventuelles actions de fixation ou de nettoyage) pour faire des évaluations plus réalistes des doses prévisionnelles.

Prises en compte de nouvelles données pour les évaluations suivantes

Les évaluations ultérieures de doses prévisionnelles dues à l'ingestion involontaire de particules radioactives devraient être menées sur des bases plus réalistes, tenant compte :

- des mesures réelles de dépôts labiles dans les habitations ou dans les lieux fréquentés à l'extérieur, en prévoyant leur évolution au cours du temps en fonction de la décroissance radioactive ;
- de données acquises sur les risques d'ingestion, à l'aide de tests ou d'éventuelles mesures d'incorporation ;

- des améliorations de l'état radiologique de l'habitat et de l'environnement résultant des éventuelles actions de nettoyage effectuées.

Considérant que ces réévaluations devraient donner des résultats moins pénalisants que ceux des premières évaluations, elles devraient permettre, en association avec l'évaluation des doses dues à l'irradiation externe, d'aider à la décision d'un éventuel retour des populations sur une partie des territoires où une décision d'éloignement immédiat aurait été prise.

En complément, les données représentatives du risque d'exposition par ingestion involontaire devraient également permettre d'évaluer les doses prévisionnelles sur une plus longue période (un an après le premier mois suivant l'accident), en vue d'un éventuel éloignement différé des populations.

5.2.3.3. Doses dues à l'ingestion de denrées d'origine locale

- **Données initiales retenues par hypothèse pour les premières évaluations**

L'évaluation prédictive de la contamination des denrées d'origine locales est menée selon la démarche décrite au paragraphe 5.2.2.1, en considérant les catégories de produits cultivés, issus de l'élevage ou d'origine naturelle susceptibles d'être disponibles à la consommation au cours du premier mois suivant l'accident (caractère saisonnier).

Lors des premières évaluations (en fin de la phase d'urgence ou au début de la phase post-accidentelle), il est difficile de connaître quelles sont les denrées réellement produites sur les différentes parties du territoire. Il est donc supposé que toutes les catégories de denrées prenant part à l'autoconsommation, compte tenu de la saison, sont produites à l'endroit où résident les personnes pour lesquelles sont évaluées les doses dues à l'ingestion de denrées alimentaires.

L'évaluation des doses dues à l'ingestion de denrées d'origine locale est faite pour des groupes de personnes représentatifs de la population qui réside sur le territoire contaminé, en prenant comme référence les modes d'alimentation en milieu rural ; en général, les enfants de 2 à 7 ans des zones rurales devraient constituer le groupe de population le plus sensible à l'ingestion de denrées contaminées et devraient ainsi être considérés en priorité lors des premières évaluations de dose. Les données sur les régimes alimentaires sont nécessairement celles connues avant l'accident, de préférence spécifiques au site où l'accident s'est produit ou, dans le cas contraire, issues d'enquêtes alimentaires nationales (voir recommandation n°1 du § 2.2.3). L'estimation des doses à l'aide cette approche, combinée à celle due aux autres voies d'exposition, servirait à définir la zone de protection des populations à l'intérieur de laquelle serait notamment prescrite une interdiction de consommer ou de commercialiser les denrées produites localement.

En complément, selon les priorités d'expertise et les demandes des autorités, d'autres évaluations de doses dues à l'ingestion de denrées locales pourraient être faites pour des catégories de personnes non représentatives de la population générale mais dont le mode d'alimentation serait particulièrement sensible à la contamination alimentaire au cours du premier mois (végétarien, consommateur régulier de produits laitiers frais, alimentation en autarcie totale...), comme le propose la recommandation n°3 du paragraphe 2.2.3. Ces évaluations complémentaires pourraient conduire les autorités à émettre des recommandations visant à déconseiller ou à modérer la consommation des denrées présumées les plus

contaminées, à l'attention des populations vivant en périphérie extérieure à la zone de protection des populations.

- **Prises en compte de nouvelles données pour les évaluations suivantes**

Outre la réévaluation des dépôts initiaux (cf. § 5.2.1) qui peut avoir une influence très sensible sur la zone de protection des populations, des données nouvelles acquises après l'accident devraient être prises en compte lors de la mise à jour de l'estimation des doses dues à l'ingestion de denrées locales au cours du premier mois suivant l'accident :

- une identification plus précise des productions agricoles ou naturelles effectivement présentes sur le territoire considéré, ainsi que leur distribution géographique ;
- les résultats de mesure de la contamination des denrées agricoles à l'intérieur de la zone de protection des populations, dans le cadre des programmes de surveillance mis en place, ainsi que ceux obtenus dans la zone de surveillance renforcée des territoires ;
- des données plus précises sur certains paramètres d'élevage et agronomiques spécifiques aux territoires considérés, compte tenu du moment de l'accident.

En admettant que les premières évaluations ont été menées de manière conservatrice, les résultats des nouvelles évaluations dosimétriques pourraient conduire les autorités à réduire l'emprise de la zone de protection des populations, libérant une partie des territoires qui passeraient alors en zone de surveillance renforcée.

Par ailleurs, les nouvelles données disponibles au fil des jours permettraient de réaliser des évaluations de doses prévisionnelles sur des périodes dépassant la fin du premier mois suivant la fin de l'accident, notamment en tenant compte des nouvelles productions agricoles et des stratégies de gestion des terres cultivées et de l'élevage destinées à améliorer la qualité radiologique des produits. Ces évaluations complémentaires serviraient à anticiper l'évolution de la zone de protection des populations, en concertation avec les parties prenantes locales (cf. § 5.3 ci-après).

5.3. CONCERTATION AVEC LES PARTIES PRENANTES POUR L'EXPERTISE DES CONSÉQUENCES POST-ACCIDENTELLES

La démarche d'expertise itérative décrite précédemment ouvre la possibilité d'engager progressivement une concertation entre les organismes d'expertise (notamment l'IRSN dans le cadre de sa mission d'expertise de crise) et les parties prenantes directement concernées par l'évaluation des conséquences post-accidentelles, en s'appuyant sur l'organisation qui serait mise en place par les pouvoirs publics au cours de la phase de transition post-accidentelle (cf. GT7 en particulier).

Lors des premières évaluations, au cours de la phase d'urgence ou au début de la phase de transition post-accidentelle, les échéances courtes de remise des résultats d'évaluation prédictive ne permettraient pas d'établir un dialogue organisé avec les parties prenantes locales. Il serait néanmoins souhaitable que soient organisés des échanges rapides avec les services de l'État (DDAF, DSV et DDASS notamment) mobilisés par le PPI, à même de fournir des informations sur des données contextuelles spécifiques aux activités agricoles, d'élevage ou aux populations.

Par la suite, il est recommandé d'établir une concertation structurée avec les parties prenantes locales directement concernées par les résultats d'évaluation : outre les services de l'État, pourraient également participer les CLI, les élus territoriaux (maires notamment), les représentants des professions agricoles, des activités économiques, des associations traitant de sujets sociaux ou environnementaux, etc.. Cette concertation devrait se mettre en place au cours du mois suivant la fin de l'accident, et si possible dès la première semaine, afin de permettre :

- à l'IRSN d'exposer les bases retenues pour mener les premières évaluations prédictives des conséquences radiologiques et dosimétriques ayant servi à l'établissement initiale des zones de protection des populations et de surveillance renforcée des territoires ;
- de dresser un bilan des résultats de mesure de radioactivité de l'environnement, en les mettant en perspective des résultats des évaluations prédictives mentionnées précédemment ;
- de solliciter les parties prenantes locales afin de préciser les données contextuelles propres à l'environnement naturel, aux activités agricoles, aux activités économiques, à l'alimentation et au mode de vie des populations concernées par les évaluations ; ces données pourraient servir à mettre à jour l'évaluation prédictive des conséquences radiologiques et dosimétriques, dans la mesure où les outils d'expertise permettent leur intégration.

Cette démarche nécessiterait, de la part de l'IRSN, un effort de présentation pédagogique de ses résultats d'expertise et, bien sûr, une transparence à la fois sur ces résultats mais aussi sur les données et hypothèses qui en sont à l'origine.

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce rapport, résultat de 10 réunions du groupe de travail « Hypothèses » entre 2007 et 2009, n'est pas un aboutissement mais constitue une base de travail et de discussion pour le futur. Il a le mérite de donner un aperçu assez complet des points importants à appréhender lors des évaluations prédictives des conséquences radiologiques et dosimétriques, au moment où débute la phase de transition post-accidentelle, et de proposer des pistes pour le choix des valeurs de paramètres contextuels utilisés lors de telles évaluations, ainsi que des voies d'amélioration et de développement pour le futur.

Ce rapport doit donc conserver un statut de document de travail. Son usage peut se concevoir au moins de trois façons complémentaires :

- 1) dans le cadre de la poursuite des travaux du CODIR-PA en 2010, certains éléments de ce rapport pourraient être discutés et repris au sein de la nouvelle commission n°1, en charge de préciser la doctrine d'action lors de la phase de transition post-accidentelle (élaboration de lignes directrices) ;
- 2) parallèlement, le contenu de ce rapport pourrait servir de base de travail dans le cadre de la poursuite des concertations avec les acteurs locaux (services de l'État, CLI, parties prenantes concernées) afin de tester la perception et l'adéquation de certaines approches proposées dans le rapport. En particulier, plusieurs points pourraient être approfondis à l'occasion de cette concertation locale : comment améliorer la connaissance des pratiques alimentaires et des modes de vie sur les territoires pouvant être affectés par des conséquences post-accidentelles ? Comment les acteurs locaux pourraient-ils apporter leur concours à l'expertise de l'IRSN en fournissant, au cours de la phase de transition post-accidentelle, des données contextuelles exploitables lors de la mise à jour des évaluations des conséquences post-accidentelles (cf. § 5.2 et 5.3) ? Comment est perçue par les parties prenantes locales la démarche itérative d'expertise proposée dans ce rapport, pouvant conduire à revoir à la baisse (et éventuellement à la hausse) l'emprise des territoires à l'intérieur desquelles les valeurs guides servant à définir les zones de protection du premier mois seraient dépassées ?
- 3) bien entendu, les propositions de ce rapport sont susceptibles d'être considérées par l'IRSN dans le cadre des développements futurs de méthodes et d'outils opérationnels d'expertise de crise adaptés à la gestion post-accidentelle. En effet, comme indiqué dans l'introduction du chapitre 5, il n'est pas certain, à ce jour, que l'ensemble des recommandations proposées par le GT « Hypothèses » puissent être suivies dans leur portée pratique. Il serait donc souhaitable que l'IRSN présente, à l'issue de ses développements en cours, comment il a intégré ou adapté certaines de ces recommandations.

Au-delà, les pistes proposées par ce rapport sont susceptibles de conduire à de nouveaux travaux d'étude, le cas échéant menés entre partenaires multiples. Par exemple, l'IRSN s'est d'ores et déjà rapproché de l'AFSSA pour approfondir les échanges sur les connaissances et les méthodes relatives aux enquêtes alimentaires, sujet particulièrement important dans le contexte post-accidentel.

BIBLIOGRAPHIE

BEGEAT, 1993. Enquête alimentaire - Site de Civaux. 33 pages et annexes.

Bertrand (1993). Enquête INSEE « Consommation et lieux d'achat des produits alimentaires en 1991 : objectifs et méthode.

Calmon P, Mourlon C (2006). Équations et paramètres du logiciel ASTRAL V2.3. Rapport IRSN DEI/SECRE 06-47.

Cessac B, Beaugelin-Seilier K, Métivier JM et al. (2002). CIBLEX. Banque de données de paramètres descriptifs de la population au voisinage d'un site pollué. Rapport IRSN DPRE/02/03 DPHD/02/02.

Descamps B, Guillet F (2003). Enquête alimentaire dans trois secteurs de la Basse Vallée du Rhône : Codolet, Tresques, Camargue. Consommation-Autoconsommation. Radioprotection, 38 (3) : 299-322.

Durand V, Mercat C (2007). Méthodologie des enquêtes alimentaires menées autour des installations nucléaires. Rapport IRSN/DEI/SESURE-2007-12.

Durand V, Mercat-Rommens C (2007). Projet SENSIB - Comparaison des résultats de l'enquête alimentaire de Pierrelatte - Tricastin avec d'autres enquêtes françaises. Rapport DEI/SESURE 2007-45.

Durand V, Mercat-Rommens C (2007). Comparing many French food surveys results to generalize the risky feeding behaviours. International ISEE/ISEA Conference, Mexico, 4-10 October 2007.

Eckerman KF, Ryman JC (1993). External Exposure to Radionuclides in Air, Water and Soil. Federal Guidance Report 12-EPA 402-R-93-081

IAEA (2005). Radiological Aspects of Non-fixed Contamination of Packages and Conveyances. TECDOC Series 1449.

IRSN/DEI/SARG Rapport en cours d'élaboration. État de l'expérience internationale dans le domaine de la modélisation de la réhabilitation des zones urbaines contaminées.

Jacob P, Rosenbaum H, Petoussi N (1990). Calculation of organ doses from environmental gamma rays using human phantoms and Monte Carlo methods. Part II. Radionuclides distributed in the air or deposited on the ground. GSF-BERICHT 12/90.

Lafay L, Volatier JL - coordonnateurs (2009). Étude Individuelle Nationale des Consommations Alimentaires 2 (INCA 2), 2006-2007. AFSSA, 225 pages.

Lahriga B (2004). Définition de jeux de paramètres pour l'évaluation dosimétrique. Rapport IRSN DPRH/SER/UETP 04-29.

Navarro E (2008). Modélisation de l'ingestion involontaire Détermination des paramètres nécessaires au calcul. Rapport IRSN DEI/SESUC n°2008-099.

Perrin ML (2003). Base de données de coefficients de dose. Ecrin_V1_internet. Manuel utilisateur. Note technique IPSN-DPHD SEGR-03-48.

Réales N, Quentric E (2007) CODIR-PA : présentation de deux scénarios d'accident affectant une centrale nucléaire française. Rapport IRSN DEI/SARG/07-026 - DEI/SESUC/07-53.

Réales N, Masset S, Navarro,E (2008). CODIR-PA. Conséquences à court et moyen termes d'un rejet de plutonium dans l'atmosphère. Rapport IRSN DEI/SESUC-08-67.

Renaud P, Champion D, Brenot J (2008). Les retombées radioactives de l'accident de Tchernobyl sur le territoire français. Conséquences environnementales et exposition des personnes. Tec&Doc, Lavoisier

RODOS (1999) Model description of the terrestrial food chain and dose module FDMT in RODOS PV 4.0. RODOS(WG3)-TN(99)17.

Roussel-Debet S (2003). Note technique concernant la remise en suspension. Rapport IRSN/DPRE/SERLAB 03-20.

Roy M, Malarbet JL, Courtay C (1993). Débits respiratoires et activités quotidiennes : paramètres de l'exposition aux substances inhalées. Radioprotection 28 (3) : 279 - 290.

Soulhac L, Didier D (2008). Projet PX. Note de principe Px 1.0. Rapport IRSN DEI/SESUC 08-39.

Volatier JL, 1999. Enquête INCA sur les consommations alimentaires, Tec&Doc, Lavoisier.

ANNEXE 1 - LISTE DES PARTICIPANTS AU GT « HYPOTHÈSES »

Organismes conviés et participation aux réunions du GT :

		Réunion 1	Réunion 2	Réunion 3	Réunion 4	Réunion 5	Réunion 6	Réunion 7	Réunion 8	Réunion 9	Réunion 10
IRSN	Alain DESPRES	X	X								
	André OUDIZ	X	X								
	Bruno CESSAC	X	X		X	X	X	X	X	X	
	Didier CHAMPION			X	X	X	X	X	X	X	X
	Emmanuel QUENTRIC		X	X							
	Karine HERVIOU			X		X	X	X	X		
	Nicolas REALES	X		X		X	X	X			
	Philippe RENAUD				X	X	X	X	X	X	X
	Sylvie ROUSSEL-DEBET				X	X	X	X	X		X
ASN	Florent MATOUK			X	X	X		X			
	Isabelle MEHL-AUGET	X	X	X	X	X	X			X	
	Johanna FITE	X	X								
	Marie-Line PERRIN		X	X	X	X	X	X	X		X
	Marie-Noëlle LEVELUT	X									
DSND	E. HAJAS		X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Jean-Baptiste FLEUTOT	X	X	X				X			
Ministère Agriculture DGAL	Caroline QUINIO	X			X						
	Charlotte GRASTILLEUR	X				X		X			X
Ministère Agriculture CGAAER	Alain DASSONVILLE	X									
	Anne BARILLON	X	X	X	X	X	X	X			
	François DURAND								X		
AFSSA	M. PLATEAU / J.L. VOLATIER						X				X
DDSC	Christian GÉNEAU / Bruno HERON	X	X		X	X					
InVS	Philippe PIRARD				X	X		X		X	
Météo France	VALBONETTI Paul	X				X			X		X
ANCLI	Albert COLLIGNON	X									
	Monique SENE	X	X	X	X		X	X	X	X	X
CEPN	Céline BATAILLE	X				X		X			
	P. CROUAIL	X	X	X	X		X			X	
Robin des Bois	Jacky BONNEMAINS										X
ACRO	Jean-Claude AUTRET										
CEA	Patrick FRACAS										X
	Jean-Claude CHAUSSEE	X	X			X					
	Marguerite MONFORT	X	X			X	X	X	X		
AREVA	DEVIN Patrick	X	X	X	X	X	X	X	X		
EDF	Guy COUDERT	X		X	X	X		X	X		X
ORS PACA	Pierre VERGER										
Organismes étrangers	NRPA - Astrid LILAND	X									
	OFSP - Christophe MURITH / M. VALLEY										

ANNEXE 2 - LISTE DES EXPOSÉS PRÉSENTÉS AU GT

« HYPOTHÈSES »

	Titre de la présentation	Auteur	Organisme
Réunion N° 1 19 mars 2007	Doctrines en situation post-accidentelle - Travaux du CODIR-PA	Isabelle MEHL-AUGET	ASN/DIS
	Données de base des scénarios étudiés par le CODIR-PA	Olivier ISNARD	IRSN/DEI/SESUC/BMTA
	Présentation des modèles utilisés en Norvège	Astrid LILAND	NRPA
	Voie d'exposition prépondérantes lors d'un accident sur un REP	Nicolas REALES	IRSN/DEI/SESUC/BSPA
	Evaluation de l'exposition des populations en phase post-accidentelle	André OUDIZ	IRSN/DSDRE/DOS
Réunion N° 3 26 novembre 2007	Travaux du CODIR-PA : premiers éléments de doctrines et questions de fond	Didier CHAMPION	IRSN/DEI
	Nouveaux besoins et questions à traiter dans le GT "Hypothèses"	Didier CHAMPION	IRSN/DEI
Réunion N° 4 8 février 2008	Etat des connaissances sur les habitudes alimentaires des Français	Vanessa DURAND	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
	Sensibilité de la dose par ingestion aux pratiques alimentaires	Philippe RENAUD	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
Réunion N° 5 7 avril 2008	Généralités sur le calcul de la dose efficace par irradiation externe due au dépôt radioactif	Sylvie ROUSSEL-DEBET	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
	Revue des modèles d'exposition externe en milieu urbain	Emilie NAVARRO	IRSN/DEI/SESUC/BSPA
	Exposition en milieu urbain : description d'un milieu complexe, sources d'exposition et facteurs de protection	Nicolas REALES	IRSN/DEI/SESUC/BSPA
Réunion N° 6 25 septembre 2008	Calcul vs Mesures pour caractériser une situation post-accidentelle	Philippe RENAUD	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
	Paramètres et modèles relatifs aux productions agricoles	Sylvie ROUSSEL-DEBET	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
Réunion N° 7 18 novembre 2008	Présentation des conséquences à court et moyen termes d'un rejet de Pu	Bruno CESSAC	IRSN/DEI/SESUC/BSPA
	Hypothèses et modèles d'évaluation de l'exposition par ingestion involontaire	Emilie NAVARRO	IRSN/DEI/SESUC/BSPA
	Hypothèses utilisées pour le calcul de l'exposition par inhalation de radionucléides remis en suspension	Florence GALLAY	APTUS - IRSN
Réunion N° 8 9 mars 2009	Modélisation des dépôts secs et humides	Olivier ISNARD	IRSN/DEI/SESUC/BMTA
	La caractérisation des dépôts en situation post-accidentelle	Philippe RENAUD	IRSN/DEI/SESURE/LERCM
	Relations dépôt/dose et Dépôt/concentration : outil simplifié pour la gestion post-accidentelle	Sylvie ROUSSEL-DEBET	IRSN/DEI/SESURE/LERCM