

# Analyse de la préparation et de la réalisation des tirs radiographiques pour le contrôle non destructif des soudures en Centre Nucléaire de Production d'Électricité sous l'angle de la cognition spatiale

M. LAFON<sup>1,2</sup>, S. TONNOIR<sup>1</sup>, A. BERTHOZ<sup>2</sup>, G. THIBAUT<sup>1</sup>

(Manuscrit reçu le 30 janvier 2008, accepté le 15 mars 2008)

**RÉSUMÉ** La gammagraphie (également appelée tir radiographique) de soudures est une opération non destructive efficace, mais qui peut être dangereuse si elle n'est pas pratiquée dans le respect d'un corpus de règles précises et contraignantes. La zone de tirs doit être délimitée de façon à en interdire l'accès à toute personne non habilitée. EDF œuvre à l'élimination des risques *via* différents leviers (matériel adapté, bonnes pratiques) tout en intégrant au mieux les tirs vis-à-vis des autres opérations de maintenance, afin d'augmenter la disponibilité de son parc nucléaire de production d'électricité. Cet article explore un axe original d'analyse de l'activité de tirs radiographiques : l'influence des représentations de l'espace de travail et de ses utilisations. Cet article pose l'utilisation de certaines contraintes de l'espace comme éléments explicatifs de difficultés dans l'activité de balisage et de réalisation des tirs. Nous proposons des analyses innovantes à partir d'observations de terrain et d'une analyse théorique provenant des sciences cognitives, complétées par des propositions techniques.

**ABSTRACT** Preparation and realization of industrial radiography for the non destructive testing of welds in Nuclear Power Plants: A spatial cognition analysis.

Controls of welds by radiographies are an efficient non destructive technique but it can be dangerous if not managed following a strict set of rules. EDF acts to avoid risks via several ways (adapted tools, best practices) and seeks for an integration of the radiographies with respect to the other maintenance operations, in order to raise the ratio of availability of the electricity production unit. This study explores an original analysis of industrial radiography: the influence of the representations of the workplace and its utilisations. This document supports the utilization of some space constraints as explanations of difficulties in the industrial radiography activity. The document proposes innovative points of view coming for on-site observations and from a theoretical background – cognitive sciences – completed by technical propositions.

**Keywords:** industrial radiography

<sup>1</sup> EDF R&D, Département SINETICS, 1 avenue du Général de Gaulle, 92141 Clamart Cedex, France.

<sup>2</sup> Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action, CNRS Collège de France, 11 place Marcelin Berthelot, 75005 Paris, France.

## 1. Contexte

De nombreuses installations industrielles sont classées « à risques » (Seveso II, ICPE – installations classées pour la protection de l’environnement, INB – installations nucléaires de base, risque amiante, etc.) notamment parce qu’elles peuvent émettre des rayonnements ou des substances nocives (particules, fluides). Ces risques peuvent être permanents ou temporaires. Ce second cas peut se présenter lors de certaines interventions de maintenance dans l’installation. Il est alors obligatoire de procéder au balisage de la zone potentiellement dangereuse, pour en interdire l’accès. On peut prendre comme exemple une manutention d’une citerne causant par accident une brèche, entraînant un écoulement de fluide au travers des passages inter-planchers. Pour éviter de telles situations, les responsables de la prévention des risques balisent, préalablement à l’opération, les portions de chaque étage à portée de propagation.

Un autre exemple est celui des « gammagraphies » pratiquées régulièrement dans les installations industrielles telles les centrales électriques d’EDF lors des arrêts de tranche : il s’agit de contrôler, *via* imagerie gamma, la tenue des soudures sur des pièces métalliques de forte épaisseur, soudures dont l’intégrité est nécessaire pour la sûreté de l’installation et/ou sa disponibilité. L’utilisation de ces gammagraphies se retrouve entre autres pour les tuyauteries principales dans les centrales électriques (thermique à flamme, nucléaire), les raffineries, les plates-formes pétrolières ainsi que les charpentes des bâtiments de défense (porte-avions, sous-marin). Cette technique consiste, comme pour une radiographie médicale, à placer un film photographique sur une soudure et à utiliser le rayonnement de la source gamma pour visualiser le cœur de la matière, sans pour autant créer de détérioration. Ceci permet de repérer au plus tôt d’éventuels défauts d’homogénéités dans le métal, en particulier dans les cordons de soudure et de déterminer leur risque de propagation ou au contraire leur stabilité. La figure 1 montre l’organisation d’un tir gammagraphique.

La gammagraphie (ou « tir radiographique ») est une opération non destructive efficace, mais qui peut être dangereuse si elle n’est pas pratiquée dans le respect d’un corpus de règles précises et contraignantes. La zone de tirs (dire « zone d’opération ») doit être délimitée de façon à en interdire l’accès à toute personne non habilitée. Le cas échéant, des écrans de protection sont placés entre l’opérateur et la source, celle-ci étant manipulée à l’aide d’une télécommande.

Toutefois, en raison de la réduction de la durée des arrêts de tranche, les tirs radiographiques vont de plus en plus devoir cohabiter avec d’autres activités de maintenance.

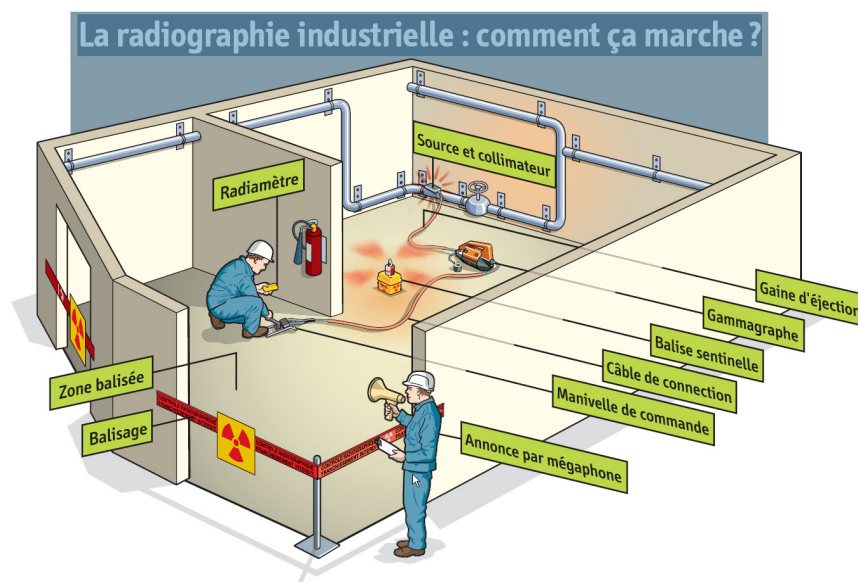


Figure 1 – Schéma général d'une gammagraphie industrielle [Crédit : Art Presse – © Magazine Vigilance].  
General layout for an industrial radiography.

### **1.1. Contribution proposée : quelle relation entre représentations de l'espace et risques ?**

Dans ce contexte de complexité croissante, cet article apporte un regard original sur l'activité radiographique au travers d'une étude portant sur la navigation humaine en environnement complexe.

La question abordée est celle de l'influence des représentations de l'espace de travail (et de ses utilisations) sur la réduction des risques. En effet, deux documents publiés sur l'activité gammagraphique (Abela, 2006 ; Tannière *et al.*, 2002) signalent la possible relation entre les risques et les représentations de l'espace : la navigation et le repérage spatial dans l'installation pourraient avoir une influence sur l'accomplissement des tâches de préparation et de réalisation du balisage, étant donné la complexité des zones de travail.

### **1.2. Bref état des connaissances en navigation**

La navigation est la capacité de se déplacer dans un espace grâce à la perception et à la compréhension de l'organisation de l'environnement, de juger des distances et

de l'orientation. Un point nécessaire au développement des outils d'aide au balisage réside alors dans la compréhension des méthodes de navigation que les opérateurs utilisent.

Les recherches en sciences cognitives établissent une distinction entre la navigation basée sur une représentation indépendante du point de vue de l'utilisateur (de type cartographique, avec une vue en « survol » de l'environnement) et celle centrée sur l'observateur (stratégie « route ») (Berthoz, 1997 ; Burgess, 2006). Il a été montré que ces deux stratégies reposent sur des bases neuronales distinctes (Ghaem *et al.*, 1997 ; Mellet *et al.*, 2000 ; Committeri *et al.*, 2004).

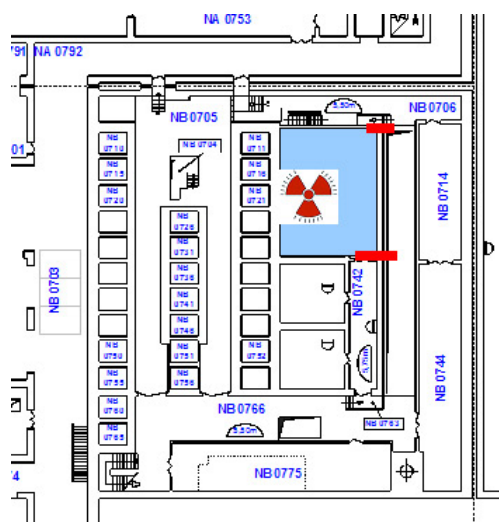
En dépit de ces connaissances, il reste de nombreuses études à mener, notamment dans le cas d'environnements complexes, mêlant à la fois environnement de très grande taille, à plusieurs niveaux et parcouru à l'aide de cartes. À notre connaissance, aucune étude n'a exploré ce domaine.

## **2. L'activité et les attentes des intervenants**

### ***2.1. Description de l'activité***

#### ***2.1.1. Organisation de l'activité***

La gestion et l'utilisation des sources radioactives sont contrôlées par plusieurs documents, notamment pour la réalisation des contrôles radiographiques. Ces notes décrivent un mode opératoire et une organisation précise : les chargés d'affaires décident des contrôles et essais à faire, puis organisent une réunion de tir. Lors de cette réunion interviennent les prestataires et le Service Prévention des Risques (SPR) qui valide les aspects de radioprotection et vérifie la cohérence de tirs. Un permis ainsi qu'un planning de tir sont délivrés lors de cette réunion (ces documents sont signés par le chargé d'affaire du projet, un responsable SPR, un responsable hiérarchique EDF, une personne de la conduite et l'opérateur en charge des tirs). Afin d'établir correctement les permis de tirs, ceux-ci doivent être fournis 48 heures minimum avant la réunion de tir, et doivent être accompagnés des plans de balisage. Le document d'organisation indique que le donneur d'ordre doit fournir aux prestataires des plans types d'installation « comprenant entre autres choses, la nature des sols, l'épaisseur des murs, les passages de câbles, de crinolines, etc. Le donneur d'ordre s'engage sur la conformité des plans en les visant et en les datant ». À partir de ces plans, le responsable des tirs doit établir son plan de balisage, éventuellement aidé du représentant SPR. Le responsable des



**Figure 2 – Exemple de plan de balisage (extrait). Les 2 traits rouges correspondent à des endroits de pose de balise ; le trisecteur localise la source du gammagraphe [Crédit : EDF].**

*Example of partial beaconing map. The 2 red segments indicate the places where the beacons have to be installed; the radioactive icon localizes the source of the gammagraphic system.*

tirs doit posséder un CAMARI, certificat d’aptitude à manipuler les appareils de radiologie Industrielle. Les plans de balisage sont ensuite collectés par EDF pour la mise en place d’une base de données nationale. Nous montrons dans la figure 2 un exemple de plan de balisage.

### 2.1.2. Gestion du risque pour les tirs gammagraphiques

L’évaluation des risques du tir (pesage) est effectuée lors de la réunion de préparation, grâce à une grille remplie par les prestataires ; elle est vérifiée par le chargé d’affaires et le SPR. Cette grille prend en compte différents paramètres importants relatifs à la source, aux caractéristiques du contrôle, à la co-activité, à l’environnement et au balisage. Dans le cas où le pesage mettrait en évidence un tir à risque particulier, des parades doivent être mises en place comme la replanification du tir en week-end ou la nuit, l’isolement total de la zone, la mise en place de protections biologiques, etc. Dans le cas où le tir resterait dans la catégorie « à risque particulier » malgré les parades, le SPR doit impérativement vérifier le balisage posé avant le début des tirs.

Le balisage doit être réalisé de manière à ce que le tir ne modifie pas l’ambiance radiologique des locaux au niveau de la balise : aucun impact radiologique augmentant le niveau ambiant ne doit être mesuré. On peut alors différencier deux types de tirs du point de vue de la gestion du risque.

1/ Dans le cas d'une zone non contrôlée (comme la salle des machines), l'ambiance radiologique est très proche de 0  $\mu\text{Sv/h}$  (en tout cas  $< 7,5 \mu\text{Sv/h}$ ). S'assurer que le tir ne va pas modifier l'ambiance nécessite un balisage très large. De plus, les interfaces chantiers sont réalisées avec des personnels qui peuvent ne pas être formés aux risques radiologiques et/ou n'ayant pas d'examen médical permettant d'assurer un suivi, ce qui demande une vigilance spécifique.

2/ Dans le cas des tirs en zone contrôlée (ZC), l'ambiance radiologique n'est pas nulle ; la zone d'opération peut être plus petite. De plus, le personnel est formé en radioprotection ; chaque intervenant possède deux types de dosimètre, dont au moins un avec alarme. Tout le personnel doit porter un dosimètre passif (film dosimétrique par exemple) et un dosimètre électronique actif. En plus de fournir une lecture directe de la dose, les dosimètres électroniques individuels sont conçus pour émettre un signal sonore qui informe instantanément leur porteur des conditions de rayonnement dans une zone.

La préparation du balisage de la zone d'opération est réalisée très en amont du tir. Dans le bâtiment réacteur (BR) et le bâtiment des auxiliaires nucléaires (BAN), les accès étant réduits, les équipes de tir ne connaissent en général pas totalement la géographie des lieux.

Les tirs en salle des machines s'effectuent actuellement en fermant totalement le lieu. Cette fermeture prend en compte des passerelles qui existent et des ouvertures vers des terrasses situées sur le dessus de la salle. Une fois qu'un site a bien contrôlé tous les accès, le plan de balisage ne change généralement plus. Il se peut que le tir, situé près d'une paroi de la salle, génère des rayonnements pouvant affecter l'extérieur de celle-ci. Dans ce cas, des protections biologiques sont mises en place et un périmètre de sécurité est défini à l'extérieur de ce bâtiment. Cependant, afin de réduire les temps d'arrêts et d'augmenter la disponibilité des CNPE, d'autres activités de maintenance seront dans le futur amenées à cohabiter avec les tirs radiographiques en salle des machines, ce qui rendra le balisage plus complexe (il sera nécessaire de fermer spécifiquement une zone de la salle).

De manière générale, les tirs se déroulent de nuit, entre 21 h et 6 h. Deux opérateurs au minimum travaillent sur un tir, l'un d'eux étant affecté à la surveillance permanente de la source radioactive utilisée. Etant donné le poids de celle-ci, il ne peut pas facilement se déplacer avec elle pour s'occuper du balisage. C'est donc le second opérateur qui s'en charge. Le balisage commence vers 22 h. La validation du SPR dans le cas de tir à risque particulier intervient une heure après ; les tirs commencent dans la foulée.

Dans le cas du BR, les tirs concernent souvent entre 6 et 8 niveaux, et une dizaine de balises est posée pour chaque tir. Ces éléments montrent bien la complexité de la préparation du balisage, mais aussi de sa réalisation.

Premièrement, la navigation peut être complexe dans le bâtiment réacteur à cause de divers facteurs :

- l'environnement est peu accessible, ce qui peut induire une méconnaissance de celui-ci,
- l'état de l'arrêt de tranche peut modifier la configuration des lieux (création de passage temporaire en relation avec l'installation d'échafaudages ou la dépose de calorifuges de la circuiterie primaire, présence de chantiers),
- les « meilleurs chemins » entre un local A et un local B peuvent changer au jour le jour en raison d'autres chantiers : certaines opérations de maintenance peuvent interdire l'accès à des zones conduisant aux lieux à baliser, voire se trouver dans la zone à baliser ; elles peuvent par ailleurs produire des modifications d'ambiance radiologique, avec un impact sur la définition de la zone d'opération,
- la luminosité peut être réduite.

Deuxièmement, il n'est pas immédiat de se rendre compte de la fermeture effective d'une zone : les accès possibles sont très nombreux, et même si cela n'est pas toujours vrai, plus le nombre de niveaux impactés est élevé, plus il y a de balises à poser, et plus la difficulté croît.

## ***2.2. Attentes des intervenants EDF en CNPE***

### ***2.2.1. Vis-à-vis des événements significatifs de radioprotection***

La principale attente des intervenants EDF en CNPE est de limiter l'apparition d'événements significatifs en radioprotection (ASN, 2005) alors que l'activité d'arrêt de tranche obéit à des contraintes temporelles nombreuses et complexes, possibles sources d'incidents. À ce sujet, nous rappelons (Abela, 2006).

Ainsi, chaque site doit suivre un programme de maintenance strict et précis pour vérifier l'intégrité du matériel à risque (soudures par exemple) en vue de réduire les risques de défaillances. Certaines interventions ne peuvent être réalisées que pendant des périodes très précises de l'arrêt car les tuyauteries contrôlées doivent être strictement vides d'eau (par exemple période de « génératrice inférieure (GI) » lorsque tout le circuit primaire est quasi vide d'eau ; cette période est très propice à un grand nombre d'opérations de maintenance, mais elle a une durée limitée). Une planification serrée des opérations de maintenance est donc effectuée, et se situent sur le chemin critique de l'arrêt de tranche. Les

retards sont difficilement acceptables car ils ont des impacts organisationnel et financier importants : il faut réorganiser la suite des opérations, supprimer une activité, voire repousser le redémarrage de la centrale pour terminer l'activité de maintenance obligatoire, ou bien ils conduisent à un maintien en GI défavorable sur le plan de la sûreté. Cependant, il existe des aléas et chaque jour en période d'arrêt les tirs du soir ou du lendemain sont replanifiés en fonction des priorités données par le chargé d'affaire et des possibilités matérielles (eau dans les tuyauteries, calorifuges déposés).

Il est à noter que certains tirs sont réalisés en fonctionnement tranche en marche ; ceux-ci jouissent alors d'une préparation bien mieux maîtrisée car la pression temporelle est moindre.

#### ***2.2.2. Vis-à-vis de la cadence de l'activité***

Nonobstant cette complexité, les CNPE souhaitent que les tirs soient réalisés dans un laps de temps court et que les temps de préparation soient fortement réduits. En effet, certains CNPE préparent les tirs entre 12 et 6 mois en avance, en se constituant par exemple des bases de données de plans de balisage des tirs les plus courants, et effectuent donc grâce à l'expérience de terrain qu'ils ont acquis une partie du travail des prestataires. Ce travail conséquent peut se révéler inefficace dans le cas où il existerait des interfaces entre chantiers non prévues lors de la préparation. Il faut donc pouvoir être réactif et pouvoir modifier les plans de balisage en fonction de contraintes particulières au plus vite. À l'heure actuelle, si les intervenants s'aperçoivent qu'il faut changer une balise au dernier moment, c'est tout le plan de balisage, et donc le permis de tir (associé au plan de balisage), qui est remis en cause. Sans l'expérience du chargé d'affaire ou la présence du service prévention des risques, le tir est dans ce cas tout simplement repoussé.

#### ***2.2.3. Synthèse des attentes***

En fonction de ces différentes contraintes, les CNPE attendent une chaîne de décisions fiables en matière de radioprotection et qui puisse être intégrée dans l'organisation. En pratique, il s'agit de disposer d'un outil adapté à l'objectif métier pour qu'il puisse être un support souple et réactif en cas de changement de dernière minute du placement d'une balise (réactivité visée : quelques heures).

#### ***2.2.4. Implications sur la justesse des plans de repérage des locaux et l'efficacité des plans de balisage***

Plusieurs entreprises prestataires interviennent sur les sites EDF afin de réaliser les gammagraphies. Le CEIDRE (Centre d'Expertise et d'Inspection dans les



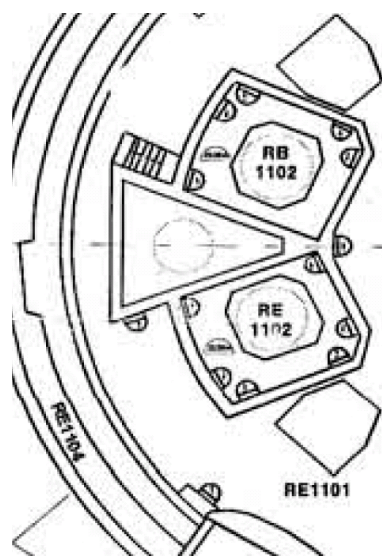


Figure 3 – Exemple de plan de repérage avec localisation des crinolines (extrait). On ne peut pas inférer de cette carte si les échelles (demi-cercles) mènent au plancher supérieur ou inférieur [Crédit : EDF].

*Example of a partial map with caged ladders. One cannot infer for this map whether the ladders (the semi-circles) lead to the upper or lower floor.*

Domaines de la Réalisation et de l'Exploitation) est l'unité d'EDF qui contrôle les tireurs et s'assure que les prestataires ont réalisé les contrôles suivant les exigences et normes de qualité légales, et celles propres à EDF. Comme indiqué au paragraphe 2.1.1, EDF fournit à l'entreprise prestataire les plans de repérage des locaux concernés qui, quant à elle, doit proposer des plans de balisage au service prévention des risques ou au chargé d'affaire ayant ordonné les tirs. Mais les plans de repérage des locaux à la disposition d'EDF peuvent être lacunaires quant à l'emplacement de certains accès tels les échelles à crinoline. Et les CNPE œuvrent à construire une documentation fiabilisée en repartant des plans de repérage des locaux produits lors de la construction du site, et en faisant des vérifications et corrections pour être conforme à la réalité de l'installation. Nous donnons un exemple de ces plans dans la figure 3.

Même fiabilisés, les plans de repérage ne sont pas automatiquement exploitables pour l'activité gamma : ils peuvent contenir trop d'informations non pertinentes pour l'activité, ce qui peut conduire à une surcharge cognitive pouvant causer des erreurs. En effet, de nombreux plans montrent les cotes et les tuyaux secondaires, ce qui ne rend pas le plan facilement lisible par les opérateurs chargés du balisage. Enfin, il n'est pas immédiat d'inférer le plancher auquel conduit une échelle (plancher supérieur *versus* plancher inférieur).

Certains sites travaillent à fiabiliser et normaliser les plans de repérage des locaux que les entreprises devront utiliser pour produire les plans de balisage. D'autres sites préfèrent préparer directement des plans types de balisage et les fournir aux prestataires pour qu'ils les exploitent tels quels. Enfin d'autres sites laissent une libre initiative aux prestataires.

Les plans dont le niveau de détail serait adapté à l'activité de balisage contiendraient de manière fiable les matériaux de construction des planchers, plafonds et murs, les emplacements des principales tuyauteries et gros matériels ainsi que l'emplacement exact des accès (escaliers, échelles, ascenseur) et des ouvertures (trémies, trappes, etc.) laissant passer le rayonnement.

### ***2.3. Attentes des prestataires***

Les prestataires veulent surtout pouvoir disposer de plans de repérage des locaux fiables afin de pouvoir réaliser de bons plans de balisage, notamment pour établir l'impact inter-planchers d'un tir (aujourd'hui, il n'existe que des plans 2D par plancher, ce qui conduit à consulter plusieurs plans pour établir l'impact spatial du tir). La reconnaissance des lieux figure également parmi les demandes principales des prestataires.

Par ailleurs, ils souhaitent avoir un contact plus important avec les chargés d'affaire EDF pour établir un dialogue étant donné que le travail de nuit ne le facilite pas. De plus, la forte contrainte qu'impose leur travail sur d'autres chantiers (ils peuvent compliquer les chantiers adjacents en coupant des accès ou les faire attendre le temps du tir) mérite un surcroît de coordination.

Enfin, la plupart des prestataires restent sensibles à la disparité de la qualité de l'environnement de travail suivant les CNPE. Citons par exemple l'éclairage, la propreté (simple et radiologique) du site. Ces facteurs sont très importants et conditionnent bien souvent le travail produit.

## **3. Observations de terrain**

### ***3.1. Déroulement des observations***

Les observations ont été recueillies lors de 3 séjours d'une durée de 8 nuits en moyenne sur 3 sites différents. Elles ont eu lieu en période d'arrêt de tranche de type ASR (arrêt pour simple rechargement du combustible, 2 visites) ou VP (visite périodique, 1 visite). Nous avons rencontré différents profils d'interlocuteurs impliqués dans les radiographies, comme la cellule END-CND (examens et contrôles non destructifs) rattaché au service travaux ou au service maintenance,

des chefs d'arrêt, le service SPR et des sous-traitants spécialisés dans la réalisation des tirs. Au total, les opérateurs en charge des gammagraphies ont été suivis sur 50 tirs. Environ 70 % des tirs observés ont eu lieu en BR ou BAN, les autres tirs observés ayant été réalisés en salle des machines (SDM).

La méthode de recueil des observations a été la suivante : nous avons tout d'abord mené un entretien semi-directif avec les opérateurs ; puis nous avons utilisé un paradigme d'observation participante. Ce paradigme permet d'observer l'activité avec une très grande compréhension des problématiques mises en jeu dans l'activité (pour une revue de ces méthodes, voir Lahlou, 2000). Cela nous a permis d'observer par exemple les erreurs corrigées « en ligne », c'est-à-dire les erreurs que les opérateurs pouvaient faire, et lorsqu'ils s'en rendaient compte eux-même, la manière dont ils les ont corrigés. Enfin, lorsque le balisage était posé, nous avons vérifié le balisage avec les opérateurs afin de noter les erreurs éventuelles dans celui-ci.

### ***3.2. Synthèse des observations***

Les observations mettent en avant qu'une proportion significative des difficultés rencontrées de non maîtrise de la zone d'opération a une origine spatiale : difficulté avec la fermeture de la zone, accès involontaires à la zone.

En règle générale, nous avons remarqué que les facteurs qui influencent qualitativement la pose du balisage sont les suivants : la bonne connaissance du terrain, la préparation correctement effectuée (suffisamment à l'avance et avec des plans fiabilisés), l'utilisation du bon matériel dédié, et surtout la présence du CA END et/ou du SPR. Il convient par ailleurs que le SPR et la cellule END/CND aient une vision partagée de l'objectif central (la réalisation du contrôle gammagraphique).

Leurs relations avec les questions de fermeture de zone et de franchissement involontaire sont les suivantes. La bonne connaissance du terrain permet notamment de bien prendre en compte toutes les échelles à crinoline (sachant qu'il y en a des dizaines, constituent autant d'ouverture possible de la zone d'opération en cas d'oubli) reliant les différents planchers. La fermeture de la zone s'en trouve renforcée, induisant une suppression des accès involontaires associés. La préparation anticipée avec des plans fiabilisés permet, pendant que les locaux sont inaccessibles (tranche en fonctionnement), de disposer de temps pour bien considérer tous les passages sensibles (encore une fois : les échelles à crinolines).

## **4. Nos analyses de la situation**

### ***4.1. Analyse technique***

Même si une indépendance de gestion et d'organisation peut exister pour chaque site (c'est-à-dire que chaque site doit pouvoir avoir une prise sur les décisions qui le concerne), nous pensons que des progrès significatifs pourraient venir d'un effort d'harmonisation de différents éléments de l'activité (plans de balisage, matériel de balisage, méthode de pesage des risques) au bénéfice des différents intervenants (autant les prestataires œuvrant spécifiquement aux tirs gamma puisqu'ils interviennent sur différents sites que tous les autres opérateurs).

#### ***4.1.1. Plans de repérage des locaux***

Il apparaît important de fiabiliser les plans pour qu'ils soient la représentation juste de la réalité de l'installation.

Les représentations graphiques utilisées pour repérer les locaux sont différentes selon les entreprises et les sites alors qu'elles renvoient à une même réalité : chacun travaille à produire des plans fiabilisés mais le fait à partir de plans divers. On observe ainsi que les plans de repérage des locaux issus de la construction sont repris par certaines entreprises, alors que d'autres entreprises reprennent les plans de sécurité (eux-mêmes issus des plans de repérage des locaux mais avec une représentation graphique différente), et que d'autres enfin exploitent les plans EDF de balisage produits par certains CNPE. Ceci conduit à des plans fiabilisés qui diffèrent graphiquement et de part leur valeur informative.

Un moyen pour progresser pourrait venir de l'harmonisation par site des plans servant au repérage des locaux. Il faut essayer d'utiliser sur un même site le même type de plan : cela améliorerait la compréhension des lieux. EDF, *via* le CEIDRE, s'est engagée sur cette voie.

#### ***4.1.2. Plans de balisage***

Les plans de balisage et leur présentation ne sont pas homogènes entre sites et entreprises : certains sites donnent un dossier avec une feuille par niveau, d'autres donnent une feuille récapitulative en A3, certains enfin commencent à inclure dans les plans de balisage des photos où sont représentés les endroits à baliser.

L'insertion, en annexe des plans, de photos des lieux à baliser apparaît comme très pertinente. On peut alors penser que la navigation et le repérage des lieux à baliser sont bien mieux effectués par les prestataires quand ils disposent de ce type d'information.

L'usage d'une symbolique claire pour identifier qu'une crinoline conduit au plancher supérieur ou inférieur est une aide métier précieuse.

La présentation en une seule feuille A3 pour tout le balisage reste peu lisible pour les prestataires du fait de la faible luminosité en bâtiment réacteur. Cependant, cette représentation reste une bonne idée pour affichage. Le fait de donner une feuille A4 par niveau à baliser est intéressant : l'opérateur peut connaître directement le nombre de balises par niveau et à chaque fois qu'il change de niveau il change de feuille et a donc peu de risques de se tromper.

Le responsable des tirs est également responsable de son plan de balisage, mais il peut être pertinent de bien préparer le balisage en amont et de l'aider à réaliser le balisage. Constituer une base de plans, comme cela commence à être mis en œuvre dans les sites, peut être efficace en prenant toutefois soin de mener la mise à jour selon les modifications de l'installation, et de modifier les plans selon les conditions réelles du terrain lors du tir (présence d'échafaudages ouvrant temporairement un passage en hauteur, ouverture des GV, zones ou chantiers ayant une emprise sur la zone à baliser, etc.).

Ceci conduit à la question de la clarification des responsabilités quant à ce plan : est-ce le SPR ou le CA END/CND qui en est responsable ? On pourrait proposer le CA END/CND à la préparation et le SPR qui valide sur place en phase de réalisation. Il en résulte un besoin de gérer précisément les processus de décision et de vérification pour une efficacité accrue. La présence fréquente sur le terrain du Chargé d'Affaire END/CND est une des clefs principales pour régler les problèmes qui peuvent annuler une nuit de tir pour cause d'erreurs (permis de tir non conforme avec le plan de balisage, mauvaise correspondance du repère fonctionnel, etc.).

L'homogénéisation des plans de balisage et de leur présentation contribuerait à l'amélioration de la vérification des plans de balisage.

#### **4.1.3. Reconnaissance des lieux**

Un bon moyen pour les prestataires d'avoir un contact avec les interlocuteurs EDF et de disposer de plans fiables serait que les agents EDF puissent reconnaître l'installation avec eux. Cela est rarement fait parce que les horaires décalés des tireurs ne le permettent pas beaucoup. Cela s'avère très important car d'une part ils seront d'autant plus efficaces (plus rapides) dans leur balisage qu'ils connaîtront mieux les lieux, et d'autre part, ils appréhenderont plus facilement le balisage et seront plus à même de détecter d'éventuelles difficultés dans la préparation des plans de balisage.

#### **4.1.4. Pose et dépose des balises**

Il pourrait être intéressant de généraliser la numérotation des balises et la planification séquentielle de la pose et de la dépose de celles-ci, afin que l'opérateur bénéficie d'une aide pour ne pas oublier de poser ou de déposer certaines d'entre elles (l'oubli de déposer des balises n'est pas dangereux du point de vue de la radioprotection mais il peut entraîner des difficultés pour les autres opérations de maintenance, car les autres opérateurs devront tenir compte de la balise oubliée et donc ne pas la franchir : cela bloque un accès pour rien).

#### **4.1.5. Doubles balisages**

Les « doubles balisages » méritent une attention particulière : on parle de double balisage lorsque deux équipes (d'une même entreprise ou pas) doivent poser une balise à un même endroit. Chacun baliseur doit poser ses balises et les reprendre. En cas de recouvrement de zones balisées, il faut établir un protocole commun strict de pose et de dépose des balises afin que chacun puisse poser et récupérer ses balises simplement et sans risque (c'est-à-dire sans franchir le balisage de l'autre équipe sans accord).

### **4.2. Analyse cognitive spatiale**

Parmi les difficultés observées lors des tirs, nous pouvons indiquer qu'environ la moitié d'entre elles fait intervenir la représentation de l'espace tandis que les autres relèvent de la tâche à effectuer en elle-même et de l'organisation de l'activité. Nous allons dans la suite focaliser notre analyse sur les aspects spatiaux des problèmes apparus lors des tirs gamma.

#### **4.2.1. Sur l'écart entre les cartes et la réalité de l'installation**

À l'aide d'une étude théorique (Lafon *et al.*, 2008), nous avons montré que, lors de l'exposition de sujets à plusieurs informations sensorielles, ils préfèrent sélectionner des informations pertinentes en fonction (1) du contexte sensoriel, (2) de la tâche à accomplir, plutôt que d'effectuer une pondération des différentes informations. Ainsi, si on présente une carte d'un environnement différente de l'environnement que le sujet aura vraiment à parcourir pour l'apprendre, les sujets utiliseront tantôt la carte, tantôt la représentation qu'ils se seront construite grâce au parcours physique de l'environnement, selon les tâches qu'ils auront à effectuer et la manière dont elles devront être effectuées (dessin ou parcours physique pour rejoindre une cible par exemple). D'autres études comme (Lambrey et Berthoz, 2003) montrent que cette sélection de l'information lors d'un conflit sensoriel dépend également de l'individu : les limites d'utilisation des différentes représentations sont différentes suivant les individus.

Ces études permettent de comprendre les difficultés rencontrées lorsqu'on a un plan différent de la réalité physique (plan de repérage des locaux inexact par exemple). D'après nos expériences, les opérateurs ont alors deux représentations dans deux contextes sensoriels différents. Ils doivent donc se fixer sur une seule des représentations, et comme ils consultent, lors de la planification de leur trajet, le plan de balisage, ils vont plutôt faire confiance à ce plan tant qu'ils ne détectent pas le conflit entre le plan et la réalité physique. Sinon, ils vont essayer de faire appel à leur représentation sensorielle (visuelle ou kinesthésique) du CNPE. Mais comme ils ne connaissent pas totalement l'installation en raison de sa complexité et de sa faible accessibilité (et qu'ils peuvent être l'objet d'une confusion avec un autre site), les opérateurs rencontrent des difficultés. De plus, les différentes tâches à effectuer pour un tireur gamma (planification du balisage et pose du balisage) forment deux contextes différents. Ils vont donc utiliser des informations différentes pour réaliser ces tâches et vont donc peut-être utiliser deux représentations différentes de l'espace, alors qu'ils sont obligés de tout ramener sur le plan de balisage. Ceci entraîne un « jonglage » entre les différentes représentations, qui peut aussi être source de problèmes.

En somme, il ressort qu'il faut prioritairement fiabiliser les plans ou bien effectuer la planification sur les lieux et non sur une carte, et qu'il faudrait idéalement utiliser deux représentations, chacune propre à chaque tâche. Par exemple, pour la planification, utiliser des indices 3D car les relations entre les différents niveaux sont indispensables, ce qui n'est pas autant nécessaire pour la pose du balisage (l'utilisation des plans pouvant alors suffire).

#### ***4.2.2. Sur les référentiels***

Un des principaux problèmes que nous avons identifiés consiste en l'utilisation au cours d'une même tâche de référentiels spatiaux différents (recherche de la zone d'opération dans le référentiel global du CNPE, puis pose des balises dans le référentiel de la zone à baliser, par exemple). Ici on appelle « référentiel » la zone qui sert de référence pour se repérer. Par exemple : « je suis en haut à gauche de la zone de tir » utilise le référentiel local de la zone de tir, « je suis en haut du bâtiment réacteur » utilise le référentiel global du bâtiment réacteur ou encore « ma zone de tir est en bas du BR » utilise un référentiel externe, et compare deux lieux. Ceci peut expliquer des confusions intérieur/extérieur dans la pose du balisage.

#### ***4.2.3. Sur l'allégement de la planification de trajet lors de la réalisation du balisage***

Les études de Wiener et Tenbrink (2008) montrent que la planification de trajet pour aller de place en place est normalement bien effectuée lorsqu'on ne dépasse

pas 9 ou 10 places. Ceci est surtout dû à la complexité croissante liée à l'augmentation de la combinatoire des chemins possibles lorsqu'on rajoute une place. Il faut un artefact d'aide à la navigation lorsque le nombre de balise dépasse cette limite, pour éviter des oublis ou encore pour être certain d'optimiser le trajet, réduire le temps de pose du balisage et la fatigue de l'opérateur.

#### **4.2.4. Sur la charge cognitive des opérateurs**

Enfin, la charge cognitive des opérateurs devrait être réduite car les tâches effectuées sont extrêmement complexes. Il est en effet connu depuis longtemps que le cerveau ne peut pas traiter toutes les informations disponibles dans l'environnement et que les informations sont traitées selon leur pertinence dans la réalisation de la tâche. Plus le nombre de tâches à effectuer simultanément est grand, moins la prise d'information et par conséquent l'efficacité de la réalisation de la tâche est poussée. Cette charge cognitive pourrait par exemple être réduite en distinguant d'une part le repérage spatial et la navigation et d'autre part la tâche à effectuer, de manière à ce que les opérateurs n'aient qu'une tâche à effectuer à la fois.

#### **4.2.5. Synthèse**

Il conviendra donc de distinguer, dans les indications données aux opérateurs, d'une part les difficultés liées à la navigation et au repérage spatial, où nous pourrions essayer de construire des artefacts pour améliorer la navigation des opérateurs, et d'autre part les difficultés liées à la mauvaise exécution de la tâche intrinsèque.

Des solutions peuvent être proposées par EDF R&D (voir chapitre suivant). Pour mener expérimentalement un test sur des indices utiles aux opérateurs pour la navigation, un système de réalité virtuelle permet de créer artificiellement un conflit sensoriel entre les informations visuelles et non-visuelles lors des déplacements pour la réalisation des tirs radios dans un environnement complexe. Ce conflit fait alors ressortir l'indicateur préférentiel. Le connaissant, nous pourrions base nos solutions sur l'optimisation de ces indicateurs. Ceci nous amènerait à proposer des solutions innovantes qui utiliseraient les bons indices pour l'exécution des tâches, tels qu'un ou plusieurs référentiels stables et normés afin d'accroître la performance des intervenants.

## **5. Ce qu'EDF R&D propose d'apporter aux END/CND**

Dans ce chapitre, nous décrivons des moyens capables de réaliser les préconisations proposées au chapitre précédent.



Sur le sujet de la maintenance et des processus associés à la préparation et au suivi des arrêts de tranche, plusieurs projets actuellement menés par EDF R&D s'appuient sur des travaux de recherche en « documentation tel-que-construit » (relevés laser 3D des installations) et en « réalité virtuelle » (interface entre l'homme et l'ordinateur).

C'est à partir de la compétence développée avec ces projets que nous proposons les pistes suivantes. Elles ont naturellement pour vocation de s'associer aux initiatives menées par les CNPE afin d'aller plus loin ensemble.

### ***5.1. La production d'une documentation 2D et 3D précise exploitables pour les CND/END***

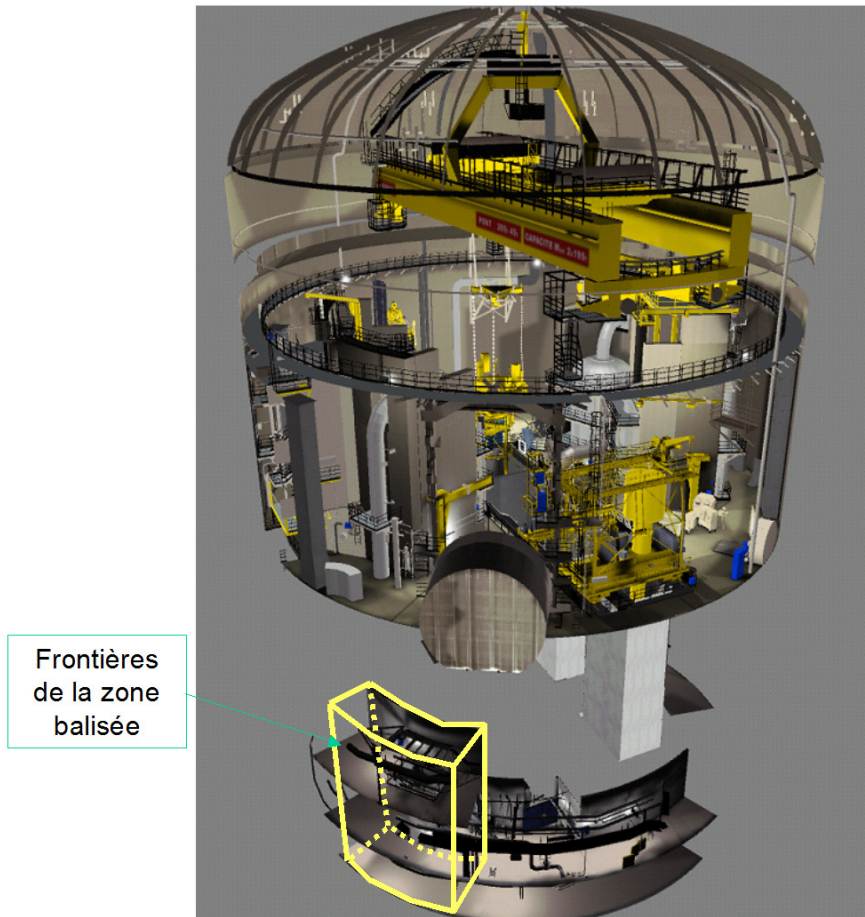
D'une manière générale, les capacités technologiques de création de plans exacts des installations augmentent rapidement avec l'arrivée sur le marché de systèmes de relevé laser tridimensionnel et de modélisation 3D à partir d'images.

EDF met régulièrement en œuvre de tels systèmes pour la préparation de certains chantiers de maintenance. Par ailleurs, EDF constitue progressivement un corpus de représentations 3D à partir des plans de repérage des locaux (au moyen d'outils de CAO 3D) en les fiabilisant à l'aide des mesures laser 3D faites sur le terrain. Les mêmes outils CAO permettent alors de créer des coupes horizontales et verticales sur les données 3D, produisant des plans fiabilisés.

### ***5.2. L'assistance à la préparation du balisage***

Ces données 3D peuvent être également exploitées en phase de préparation : une fois ces données chargées dans un logiciel destiné au préparateur, un calcul de connexion géométrique entre locaux lui montre les passages à baliser (en début de préparation) puis les éventuels passages restés béants (au fur et à mesure de la préparation). Ce calcul topologique 3D a d'ores et déjà été testé sur un BR P'4 3D.

Le recours aux données 3D permettrait également de travailler dans un référentiel stable et unique tout au long du processus de préparation et de contrôle, ce qui allègerait la tâche de l'opérateur. En se référant à notre analyse sur les référentiels, nous pouvons anticiper le fait qu'agir sur l'environnement 3D en le manipulant favoriserait la compréhension de l'espace et la préparation du balisage : zoom avant pour voir en détail le cheminement de crinoline en crinoline ou zoom arrière pour prendre conscience du cheminement global, rotation pour passer d'un point de vue où on est dans un local à un point de vue où on voit des locaux depuis l'extérieur, aidant la prise d'indices sur les frontières de la zone à baliser, etc. De plus, les techniques graphiques 3D permettraient de mettre en



**Figure 4** – Exemple de modèle 3D d'aide à la préparation du balisage avec figuration de la zone d'opération (au niveau de la sortie du local de l'échangeur RCV) [Crédit : EDF].

*Example of 3D model for assisting the preparation of beaconing with indication of the operation zone close to the exit of the RCV exchanger room.*

valeur les zones d'intérêt : masquage du voile BR ou d'autres murs pour dégager la vue, affichage de la zone d'opération en surimpression ou transparence, avec présentation des parties cachées. Ceci permettrait de montrer simultanément le référentiel global (le BR) et le référentiel local (la zone d'opération), moyen direct de renforcer la prise de repères. Nous donnons une illustration de l'intérêt d'un modèle 3D dans la figure 4.

### **5.3. La production de plans 2D de pose pour les END/CND**

Pour la pose des balises, la documentation 3D entant que telle n'aurait pas une plus value importante. En revanche, elle serait judicieusement exploitée pour produire par coupe un jeu de planches 2D avec des renvois graphiques entre planches localisés au niveau des accès (échelles à crinolines montantes ou descendantes, escaliers, ascenseur).

### **5.4. Guidage en zone contrôlée**

D'autres opportunités techniques se présentent, tels les systèmes mobiles pour les opérateurs en zone contrôlée : ils pourraient être complétés par un système de navigation, dans la veine de ceux disponibles pour le guidage routier.

Imaginons qu'un préparateur d'un tir veuille réduire la zone d'opération pour laisser plus de place à un autre chantier. Sur son (futur) terminal portable, il déplacerait interactivement des balises dans le modèle 3D du bâtiment grâce au logiciel d'assistance aux tirs gamma ; le logiciel détecterait alors les accès rendus béants et le guiderait dans le modèle 3D pour qu'il valide chaque nouvel accès proposé. Le gain serait ici une performance accrue dans la complétude du balisage. Il y aurait aussi un gain en temps : si un autre chantier devenait possible grâce à ce gain de place et pourrait se faire en parallèle du tir, ce serait autant de gagné sur le planning d'arrêt.

## **6. Conclusions et perspectives**

Il existe donc un potentiel technologique pouvant contribuer à assister une partie de la problématique CND/END, en prenant bien en compte les capacités cognitives spatiales sollicitées dans cette activité.

**Remerciements.** *Nous remercions vivement les CNPE ayant accueilli Matthieu LAFON, sans lesquels nous n'aurions rien pu faire. Nous remercions EDF/DTG et EDF/UTO pour les explications fournies sur les différents plans de centrale, et EDF/DPN/UNIE pour le partage d'expérience.*

## **RÉFÉRENCES**

- Abela G. (2006) Radiation protection and inspection of industrial radiography, *Radioprotection* **41**, 169-187.
- ASN (2005) Guide relatif aux modalités de déclaration et à la codification des critères relatifs aux événements significatifs impliquant la sûreté, la radioprotection ou l'environnement applicable aux installations nucléaires de base et au transport de matières radioactives, Autorité de sûreté nucléaire, octobre 2005.

- Berthoz A. (1997) Parietal and hippocampal contribution to topokinetic and topographic memory, *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* **352**, 1437-1448.
- Burgess N. (2006) Spatial memory: how egocentric and allocentric combines? *Trends Cogn. Sci.* **10**, 551-557.
- Committeri G., Galati G., Paradis A.-L., Pizzamiglio L., Berthoz A., Le Bihan D. (2004) Reference frames for spatial cognition: different brain areas are involved in viewer-, object-, and landmark-centered judgments about object location, *J. Cogn. Neurosci.* **16**, 1517-1535.
- Ghaem O., Mellet E., Crivello F., Tzourio N., Mazoyer B., Berthoz A., Denis M. (1997) Mental navigation along memorized routes activates the hippocampus, precuneus, and insula, *Neuroreport*. **8**, 739-744.
- Lambrey S., Berthoz A. (2003) Combination of conflicting visual and non-visual information for estimating actively performed body turns in virtual reality, *Int. J. Psychophysiol.* **50**, 101-115.
- Lahlou (2000) *Le design cognitif: application au problème de la surcharge informationnelle* (partie 1 : les méthodes d'observation du travail intellectuel), Septième école d'été d'ARCo, 10-21 juillet 2000.
- Lafon M., Vidal M., Berthoz A. (2008) Maps have a selective influence on navigation tasks: towards independent spatial representations (submitted).
- Mellet E., Briscogne S., Tzourio-Mazoyer N., Ghaem O., Petit L., Zago L., Etard O., Berthoz A., Mazoyer B., Denis M. (2000) Neural correlates of topographic mental exploration: the impact of route *versus* survey perspective learning, *Neuroimage* **12**, 588-600.
- Tannièrè C., Carballeda G., Garrigou A. (2002) Human Factors in industrial radiography, European ALARA Network, Rome.
- Wiener J.-M., Tenbrink T. (2008) Traveling Salesman Problem: The Human Case, *KI: Themenheft KI und Kognition* **1/08**, 18-22.