

LA VULNÉRABILITÉ DES CENTRALES NUCLÉAIRES FRANÇAISES AUX CHUTES D'AVION

CLIENT : GREENPEACE FRANCE

RAPPORT REF. N° : R3205-A1

JOHN H LARGE

LARGE & ASSOCIATES
CONSULTING ENGINEERS
LONDON

Résumé traduit de l'anglais par Greenpeace France

1 ST ISSUE	REVISION N°	APPROVED	CURRENT ISSUE DATE
12 NOVEMBER 2011			

LA VULNÉRABILITÉ DES CENTRALES NUCLÉAIRES FRANÇAISES AUX CHUTES D'AVION

INTRODUCTION & RÉSUMÉ GÉNÉRAL

La stratégie de confinement nucléaire

La sûreté et l'étanchéité des dispositifs de « confinement » d'une centrale nucléaire sont essentielles à la sûreté nucléaire.

Ces dispositifs doivent former une barrière infaillible pour isoler les processus nucléaires et radioactifs en cours dans la centrale. Ils délimitent des espaces contrôlés et adaptés aux différents processus ainsi qu'aux matières qu'ils contiennent. Et, bien entendu, les barrières de confinement ont pour fonction d'isoler la radioactivité et de protéger la santé des êtres humains et de l'environnement en général.

L'enceinte de confinement *primaire* contient la cuve sous pression du réacteur, le circuit de refroidissement et les générateurs de vapeur. En général, elle se présente sous la forme d'une structure cylindrique coiffée d'un dôme qui domine l'ensemble de l'architecture d'un site nucléaire. Outre sa fonction de barrière de protection, le confinement primaire d'un réacteur à eau sous pression (la filière de réacteur commercial exploitée en France) joue le rôle purement passif d'un réservoir d'expansion dont le volume doit permettre de résorber et de contenir une fuite importante dans le circuit de refroidissement, en cas de défaillance survenant dans des conditions de pression élevée au cours de l'exploitation normale du réacteur.

Dans le cœur d'un réacteur en fonctionnement, au fur et à mesure que l'uranium fissile des assemblages combustibles se consomme, le combustible accumule des produits de fission hautement radioactifs. Au bout d'un certain temps, le combustible usé ou irradié doit être retiré du réacteur et entreposé temporairement dans une piscine de désactivation remplie d'eau. Le combustible usé reste immergé dans ces conditions pendant au moins cinq ans avant d'être transporté hors du site au moyen de conteneurs spécialisés (« châteaux »). Les piscines de désactivation sont situées dans une enceinte distincte de celle du réacteur, dans un bâtiment adjacent au confinement primaire.

Ces deux bâtiments, réacteur et combustible, constituent l'essentiel de l'îlot nucléaire d'une centrale. D'autres confinements radiologiques situés au sein et autour du site nucléaire abritent notamment : les réseaux et les canalisations par lesquels les boues et les effluents radioactifs sont évacués vers des installations de traitement et d'entreposage (situées également dans des structures de confinement) ; les conteneurs ou fûts renfermant les déchets radioactifs produits lors de l'exploitation ; les conteneurs ou châteaux destinés à transporter le combustible usé hors du site nucléaire vers des installations de séparation chimique ou de stockage intérimaire.

La quantité de radioactivité présente dans les différentes structures de confinement varie en fonction des processus nucléaires et de la quantité de matière nucléaire/radioactive qu'elles contiennent.

Le terme source (inventaire de la radioactivité) du combustible placé dans le cœur d'un réacteur en fonctionnement est constitué de différents radionucléides à durée de vie courte, moyenne ou longue.

Le terme source, pris en compte pour le calcul des conséquences d'un rejet radioactif, peut porter sur plus de 100 tonnes de combustible partiellement irradié contenant différents produits de fission à haute activité. Les piscines de désactivation peuvent renfermer plusieurs tonnes, voire plus de 1 000 tonnes de combustibles usés dans différents états de désintégration radioactive, selon qu'ils ont été récemment retirés du réacteur et en fonction de l'ampleur du déchargement. À certains stades de la vie d'une centrale, une piscine de désactivation peut contenir un inventaire radioactif à durée de vie plus longue et à activité plus haute que celui du réacteur auquel elle est annexée.

Afin d'isoler de manière efficace les termes sources radioactifs, la plupart des confinements sont conçus selon le principe de « défense en profondeur », qui consiste à interposer plusieurs barrières de protection pour enfermer les matières radioactives.

Par exemple, le combustible nucléaire placé dans le cœur du réacteur est composé de centaines de pastilles d'uranium faiblement enrichi empilées dans tubes (gainés) de zircaloy de faible épaisseur, scellés aux deux extrémités. Les crayons combustibles sont regroupés pour former des assemblages combustibles. Près de 200 assemblages combustibles sont ensuite insérés dans le cœur du réacteur. Le combustible reste immergé dans la cuve sous pression du réacteur qui, avec le circuit de refroidissement, se trouvent dans l'enceinte de confinement primaire. Ainsi, la gaine en zircaloy, la cuve et l'enceinte primaire constituent trois barrières de défense passive protégeant le combustible nucléaire.

Le combustible usé qui est retiré du réacteur pour être entreposé dans les piscines de désactivation ne comporte que deux barrières de protection : la gaine combustible, qui peut être affaiblie après être restée pendant deux ou trois ans dans le cœur du réacteur dans conditions intenses, et la structure du bâtiment combustible.

À certaines étapes du cycle de maintenance d'une centrale nucléaire, en général tous les 18 à 24 mois pour rechargement du combustible et/ou pour maintenance, l'une des barrières de confinement est temporairement levée. Par exemple, pour recharger le cœur du réacteur en combustible, il est nécessaire de retirer le couvercle de la cuve sous pression afin d'accéder aux assemblages. Ensuite, le transfert des assemblages combustibles hautement radioactifs jusqu'aux piscines de désactivation se fait en maintenant les assemblages sous l'eau. Pour cela, le bassin contenant la cuve du réacteur ouverte est temporairement rempli d'eau et relié aux piscines de désactivation. Lors de ces opérations, le confinement primaire inclut le bâtiment combustible. À d'autres moments, certaines activités menées dans l'enceinte de confinement sont susceptibles de mettre en danger le combustible. Un objet lourd, par exemple un château/conteneur pesant plus de 100 tonnes, pourrait tomber dans une piscine de désactivation lorsqu'il est manipulé directement au-dessus des bassins.

Il n'est pas rare que les autres structures de confinement, notamment les installations de traitement, de stockage ou de transport des déchets radioactifs, soient localisées à distance de l'îlot nucléaire et dispersées dans l'ensemble du site de la centrale. En général, chacune de ces installations contient des concentrations beaucoup moins élevées et des quantités bien moins importantes de matières radioactives. Bien que leur terme source radiologique soit largement inférieur à celui du réacteur ou des piscines de désactivation, un rejet ou une dispersion non contrôlé à l'écart du site de la centrale pourrait engendrer des conséquences sanitaires inacceptables pour les riverains du site.

Les confinements nucléaires peuvent être menacés de deux façons : 1) de l'intérieur, par exemple en cas d'Accident de perte de réfrigérant primaire (APRP) lorsqu'une brèche dans le circuit réacteur

peut entraîner une élévation de la température et de la pression dans l'atmosphère de l'enceinte de confinement ; 2) de l'extérieur, par exemple par l'impact direct d'une chute d'avion, objet de la présente étude. Des événements extérieurs n'impliquant pas forcément une pénétration du confinement peuvent aussi être à l'origine de défaillances du circuit nucléaire, soit directement en causant, par exemple, la défaillance d'un composant du circuit sous pression du réacteur pouvant engendrer une perte de réfrigérant ; soit en entraînant un grave dysfonctionnement de la sûreté nucléaire et/ou des systèmes de contrôle provoquant une cascade de défaillances et, par exemple, un APRP du circuit réacteur.

Cette étude analyse les deux cas suivants : la chute d'un avion directement sur les enceintes de confinement d'un site nucléaire, notamment sur ceux de l'îlot nucléaire, et la chute d'un avion sur un bâtiment auxiliaire d'un site nucléaire ou à l'extérieur de celui-ci, par exemple sur les digues d'un canal de refroidissement dont la défaillance pourrait déboucher sur une situation radiologique grave hors site. Ce dernier cas est illustré par les événements en cascade (tsunami, inondation – panne d'électricité – perte du refroidissement – fusion du combustible – production d'hydrogène – détonation) survenus à l'extérieur du site et ayant conduit à des défaillances catastrophiques des confinements primaires des unités 1, 2 et 3 de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi en mars 2011.

De la même façon, la chute d'un avion pourrait entraîner indirectement une situation radiologique grave sur site. Par exemple, la chute d'un avion pourrait couper la centrale des sources d'approvisionnement électrique situées à l'extérieur du site et, simultanément, empêcher les groupes électrogènes de secours sur site de fonctionner. Dans une telle situation, la centrale devrait faire face à une coupure de courant prolongée, et le refroidissement du réacteur et des piscines de désactivation ne serait plus assuré (comme cela a été le cas à Fukushima). L'impact du choc pourrait également perturber l'alimentation en eau de refroidissement, privant la centrale de sa dernière source froide.

Analyse de la vulnérabilité des centrales nucléaires françaises aux chutes d'avion

Cette étude se divise en trois parties : le **chapitre I** explique les dynamiques et les forces qui entrent en jeu lorsqu'un avion s'écrase ; le **chapitre II** examine la probabilité de chute accidentelle d'un avion et souligne le caractère « fatal » d'un acte terroriste ou de malveillance qui viserait à utiliser un avion commercial en tant qu'arme contre une centrale ; le **chapitre III** évalue les capacités des centrales nucléaires françaises actuellement en fonctionnement à faire face aux risques d'une chute d'avion d'origine accidentelle ou due à un acte terroriste ou de malveillance, ainsi qu'aux conséquences qui pourraient en découler.

Cette étude évalue également les conséquences d'une chute d'avion en termes de perte totale des sources d'alimentation électrique, d'inondation de l'îlot nucléaire et de perte de la dernière source froide, en rapport avec les tests de résistance (« stress tests ») commandés par la Commission européenne et actuellement soumis à un processus de revues croisées (« peer review »). Dans ce contexte, les conclusions des évaluations complémentaires de sûreté (ECS) commandées par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et récemment menées à terme, sont réévaluées dans les conditions d'une chute d'avion (charge d'impact, explosion du carburant, détonation et déflagration produites par le kérosène, etc.) afin de vérifier si les règles fondamentales de sûreté (« référentiel ») de chacune des différentes séries de centrale sont respectées.

Chapitre I : Précédents cas de chutes d'avion

Les chutes d'avion impliquent et entraînent des mécanismes dynamiques complexes.

Les trois exemples de chute d'un avion commercial évalués dans cette étude (les attentats du World Trade Center, du Pentagone et de Lockerbie) mettent en évidence l'intensité des forces directement exercées sur la structure impactée et les éléments situés à distance. La nature de ces forces, la façon dont elles sont générées et leur séquençage permettent à un corps relativement tendre (le fuselage en alliage aluminium) de transpercer des cibles solides et robustes (structures en acier et béton armé).

Ces exemples démontrent en outre les effets dévastateurs des fuites de kérosène à la suite de l'accident et de la désintégration de la cellule de l'avion. Lors de l'attentat du Pentagone le 11 septembre 2001, la seconde phase de destruction de la structure du Pentagone a été provoquée, dans les 12 à 20 minutes qui ont suivi l'impact, par l'exposition du bâtiment au kérosène en feu qui a affaibli les principaux éléments de la structure (colonnes, murs et dalles en béton armé). Ces éléments de la structure avaient perdu une grande partie de leur revêtement en béton anti-incendie (isolation) en raison de l'intensité des forces générées et exercées au cours de l'impact. À Lockerbie en 1998, immédiatement après la dislocation du Boeing 747 en plein vol, pratiquement toute la voilure et les réservoirs de kérosène se sont écrasés au sol avant d'exploser violemment une dizaine de secondes plus tard, lorsque le carburant a initié une déflagration qui s'est transformée en détonation, soufflant plusieurs immeubles et soulevant jusqu'à 4 000 tonnes de terre et de roche pour laisser place à un énorme cratère.

L'analyse des documents faisant autorité en la matière montre que la complexité des dynamiques et des forces engendrées par la chute d'un avion ne sont pas reflétées de façon adéquate par la notion de « chargement en fonction du temps » mise en avant par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). Pourtant, cette méthodologie sommaire et incomplète est adoptée par l'industrie nucléaire de façon quasi-universelle. Les caractéristiques charge-temps de différents types d'aéronefs, de masses globales, de vitesses d'impact et d'angles d'approche sont incomplètes parce qu'il est difficile, à la base, de modéliser de façon fiable ces caractéristiques, et parce qu'il est impossible d'extrapoler à un avion de ligne commercial les caractéristiques d'une seule démonstration de chute d'un avion de combat militaire sur un bloc de béton.

Dans les situations réelles de chute d'avion, environ un quart seulement de l'énergie de l'appareil se dissipe lors de la compression et de la désintégration, au moment du « télescopage ». L'énergie résiduelle agit de façon destructrice de différentes manières. Premièrement, les composants de l'avion se désintègrent progressivement et se déplacent un peu à la manière d'une onde visqueuse, exerçant pendant un temps relativement plus long une force de poussée sur l'ensemble de la structure ciblée – il s'agit de la force variable dans le temps reflétée (pas forcément de manière appropriée) par la fonction charge-temps de l'aéronef. Deuxièmement, lorsque les éléments plus inertes et/ou plus solidement fixés de la structure cible (colonnes, dalles, etc.) sont percutés à grande vitesse par l'avion en chute, ils ne peuvent pas dépasser leur propre inertie et subissent un cisaillement plastique, permettant ainsi à un projectile relativement « tendre » -l'aéronef- de perforer les matériaux robustes de la structure cible (béton, acier, etc.). Troisièmement, vers la fin de la séquence d'impact, lorsque la vitesse de pénétration de l'avion ralentit, certains éléments de la structure peuvent activer l'inertie, en se courbant et en se déformant, là aussi en raison de la défaillance plastique des zones et éléments de la structure cible.

Au moment de l'impact, entrent également en jeu des charges et des forces qu'on pourrait qualifier de « coïncidentielles ». Certains éléments robustes qui se sont détachés de l'avion au début de la

séquence du crash (jambes du train d'atterrissage, caissons d'aile, mâts réacteur, etc.) se transforment en projectiles et continuent librement leur trajectoire. Dans le cas du Pentagone, on pense qu'une partie du train d'atterrissage-avant, qui s'est détaché de l'appareil, a été projetée vers l'avant, transperçant au moins cinq murs de la structure et glissant sur environ 90 m avant de s'immobiliser. Les charges d'impact peuvent également être ressenties sur l'ensemble de la structure sous la forme d'une onde de choc induite sur des éléments relativement éloignés de la structures ou annexés à celle-ci, causant la défaillance des éléments de fixation et d'attache et, partant, la chute ou l'envolement de composants lourds, voire essentiels à la sûreté.

Les caractéristiques de la structure cible conditionnent largement la réaction de la structure à une chute d'avion. Par exemple, un élément de faible épaisseur et à faible inertie absorbera et dissipera une bonne partie de l'énergie de l'impact en se pliant ou en se déformant, tandis qu'un élément plus robuste et épais en béton armé, à l'instar de l'enceinte de confinement primaire d'une centrale nucléaire, restera pratiquement immobile au lieu de réagir rapidement à l'impact. Dans ce cas, l'impact se propagera en grande partie à l'intérieur du béton comme une onde de contrainte-déformation, avant de rebondir sur la face postérieure de la structure et se transformer en onde de traction à laquelle le béton n'est pas très résistant, provoquant l'écaillage de la surface de la face postérieure de la structure et formant ainsi de nouveaux projectiles et/ou de profondes entailles qui affaibliraient la structure elle-même.

Il est également possible que l'impact, et en particulier l'incendie, la déflagration, la détonation et l'onde de souffle induits par la chute d'un avion de ligne dans une région habitée fassent de nombreux blessés et victimes parmi la population (comme à Lockerbie). La combustion intense et l'explosion du kérosène (Lockerbie), pourraient avoir des conséquences sur une vaste zone, ce qui paralyserait le personnel devant être dépêché d'urgence sur place. Mis bout à bout, les enregistrements de vidéosurveillance du Pentagone montrant la boule de feu et les dommages causés par l'impact et l'incendie permettent de retracer avec précision l'évolution du feu et des températures, qui ont rapidement atteint un niveau élevé à l'intérieur du bâtiment. À Lockerbie, la séquence de détonation tardive montre clairement, au vu de la destruction des bâtiments, de la quantité considérable de terre et de roche soulevée et du cratère formé au sol, que la combustion du carburant a initié une déflagration qui s'est ensuite transformée en détonation très brisante.

En résumé : la chute d'un aéronef sur un édifice est un événement complexe qui implique de multiples forces et entraîne diverses réactions de la structure. Il est extrêmement difficile de définir et de faire correspondre les caractéristiques d'un aéronef et celle d'une structure cible. La méthode actuelle, qui consiste à prendre en compte la simulation du crash d'un avion de combat militaire (d'environ 20 000 kilos) et de l'extrapoler à un avion commercial (pouvant peser plus de 130 000 kg), n'est ni fiable, ni réaliste.

L'inadéquation de la méthodologie reposant sur le concept charge-temps est reflétée par de nombreux travaux publiés sur la question, notamment lorsqu'il est question de la vulnérabilité de l'enceinte de confinement primaire des centrales nucléaires à une chute d'avion. Par exemple, les études qui ont été publiées sur la chute d'un avion de ligne commercial directement sur le confinement primaire d'une centrale ne modélisent que rarement (ou de façon inadéquate) les deux mécanismes importants de défaillance plastique, notamment le cisaillement plastique provoqué lors des attentats du 11 septembre sur le WTC et sur le Pentagone. De même, les impacts causés par les débris (transformés en projectiles par la désintégration de l'aéronef et/ou les écaillages et les fractures internes des structures en béton armé), sont difficiles à prévoir et ne font que rarement l'objet de modélisations. Pourtant, les analyses effectuées après l'attaque du Pentagone montrent

clairement que ces projectiles ont causé d'importants dégâts à des distances éloignées du point d'impact initial (plus de 90 mètres). De plus, les travaux publiés se contentent de prendre en compte la charge du séisme de dimensionnement (SDD) et font preuve de peu de réalisme quant à la défaillance et au décrochage éventuels de nombreux éléments, certains assurant des fonctions fondamentales de sûreté (par exemple les systèmes de protection incendie), situés à l'intérieur du confinement primaire ou sur l'ensemble du site.

De la même façon, l'importance des fuites de kérosène dues à la chute de l'appareil est rarement prise en considération dans la littérature existante, bien que le carburant ait contribué de façon décisive dans l'issue de l'attaque du Pentagone et du WTC (température élevée du feu a affaibli les différentes structures déjà gravement endommagées) et dans le crash de Lockerbie (détonation au sol). Dans d'une centrale nucléaire, même si les différents confinements radiologiques demeuraient intacts, il est tout à fait possible qu'une bonne partie du personnel se sente dépassée et incapable de réagir si un avion venait à s'écraser sur le site. La centrale ne serait alors livrée à elle-même, en l'absence de tout contrôle.

Chapitre II : Chute d'avion - Risques acceptables / Conséquences tolérables et actes de guerre

Les confinements radiologiques sont conçus de façon à respecter ce qu'on appelle les « règles fondamentales de sûreté » lorsque que la centrale est confrontée à une situation accidentelle. Les événements anormaux *concevables* correspondent à des situations prédéterminées pouvant être d'origine interne (par ex. : dysfonctionnement d'un composant du réacteur) ou externe (par ex. : crues inondant le site), mais dont la gravité restent dans les limites et conforme aux conditions du *dimensionnement*. En général, si on estime qu'un événement anormal, comme un séisme de magnitude importante, se produit à *priori* si rarement qu'il peut être considéré comme « hors dimensionnement », on le qualifie d'événement *inconcevable* et les risques y relatifs sont totalement ignorés.

Concernant les risques et les conséquences d'une chute d'avion sur une centrale nucléaire, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) considère que le crash d'un avion léger (d'une masse inférieure à 7,7 tonnes, bien qu'il soit souvent fait référence à l'équivalent d'un avion de chasse Phantom dont la masse non armé est d'environ 20 t) est pris en compte dans la *menace de référence* (dimensionnement) et que dans ce cas, une centrale doit continuer à fonctionner conformément aux *règles fondamentales de sûreté*. En d'autres termes, puisque la chute d'un aéronef léger est considérée comme un événement *concevable*, elle engendre un risque *acceptable*, et son issue et ses conséquences radiologiques doivent être *tolérables*. En revanche, l'ASN estime, en s'appuyant sur les rares événements précédents, que la possibilité d'une chute accidentelle d'un avion de ligne commercial est si faible qu'elle est donc *improbable*. Ainsi, puisqu'il est fort possible qu'un tel événement ne se produise jamais, ses conséquences radiologiques seraient donc intolérables.

En ignorant de tels risques, l'ASN autorise la conception et l'exploitation des centrales nucléaires française en partant du principe que les mesures à prendre face à certaines menaces extérieures (telle que la chute accidentelle d'un avion de ligne commercial) ne sont pas censées être intégrées aux *règles fondamentales de sûreté* (référentiel) pour la seule raison qu'un tel événement pourrait ne jamais se produire.

Le traitement des données relatives aux événements de chute d'avion remet sérieusement en cause la viabilité de la prévision des risques. Par exemple, dans la méthodologie adoptée, le risque final qu'un avion s'écrase sur le site d'une centrale nucléaire est avant tout évalué en fonction du taux d'accidents du trafic aérien pour les appareils volant à haute altitude, en transit au-dessus d'une région donnée, puis en tenant compte du trafic aérien des aéroports de la région qui , d'après la méthodologie, représente un risque moindre. Cependant, l'évaluation du trafic aérien d'un aérodrome situé à proximité d'une centrale est quelque peu simpliste. Elle n'introduit aucune pondération supplémentaire pour les types de risques et de dangers liés aux phases d'atterrissage et de décollage, aux manœuvres à faible altitude, aux remises de gaz, etc.

Le risque lié à chaque aérodrome local est exclusivement évalué à partir du nombre de mouvements du trafic aérien, qu'on se contente ensuite d'agréger au niveau national pour estimer le risque global, sans prendre en considération certains facteurs locaux qui pourraient contribuer au déclenchement d'un accident, tels que le risque aviaire (collisions entre des oiseaux et les aéronefs, notamment à proximité d'un marais) et, en particulier, la faible altitude et l'angle d'approche en rase-mottes d'un appareil en difficulté et/ou hors de contrôle, qui pourrait involontairement s'approcher d'un site nucléaire . L'évaluation des risques ne tient pas non plus compte du dérapage ou des

distances de projection des éléments (par ex. les assemblages moteurs) d'un appareil qui s'écraserait au sol, par exemple à la suite d'un atterrissage ou d'un décollage raté.

On constate le même laxisme dans la façon dont les centrales nucléaires sont appréhendées en tant que cibles. Par exemple, les sites sont décrits en termes de zones basses ou de zones élevées, et la plupart des analyses tiennent uniquement compte des risques de collision sur l'îlot nucléaire et l'enceinte de confinement primaire. Restreindre l'objet cible à l'îlot nucléaire revient à négliger toutes les répercussions qu'entraînerait la chute d'un avion sur un élément essentiel à la sûreté ou au maintien de celle-ci, tel qu'un groupe électrogène de secours ou son boîtier de commande, ou un crash à l'extérieur du site, par exemple sur la digue qui maintient le niveau de la dernière source froide de la centrale, dont la rupture pourrait inonder le site. En limitant l'évaluation du risque aux parties du site manifestement les plus dangereuses et sensibles, on exclut systématiquement les risques induits par une succession d'événements : par exemple, une chute d'avion pourrait détruire la digue d'un canal, ce qui pourrait entraîner l'inondation de la centrale située en aval, isolant l'îlot nucléaire et engendrant une fusion du combustible. À Lockerbie, le cratère causé par l'impact illustre les dégâts que peut provoquer la chute d'un avion de ligne commercial notamment sur le sol, les digues, des barrages, etc.

La même approche probabiliste, qui a tendance à négliger les risques et que certains trouvent inappropriée, ne peut être appliquée à des actes de malveillance tels que les attaques terroristes et les détournements d'avion. L'ASN affirme que : « Ce qui s'est passé aux USA ne relève pas de chutes accidentelles mais de véritables actes de guerre, qui ne sont pas pris en compte dans la construction des installations nucléaires¹. »

Quelle que soit la raison invoquée par l'ASN pour ne pas prendre en compte ces risques, les 58 réacteurs implantés sur le sol français n'en restent pas moins vulnérables à la chute d'un avion commercial. Après tout, les catastrophes font partie de la réalité : le *Titanic*, considéré comme insubmersible, a bel et bien coulé ; des individus ou des groupes malveillants ont planifié et mené à bien les attaques suicides du 11 septembre 2001, qui ont fait des milliers de victimes. Alors qu'on pensait avoir tiré les enseignements du naufrage du *Titanic*, le bateau de croisière ultra moderne *Costa Concordia* a récemment sombré dans des eaux peu profondes. Ainsi, il y a peu de chance pour que les futures générations de centrales, à l'image du *Costa Concordia*, bénéficient des leçons du passé.

Il est certain que la chute d'un avion sur une centrale nucléaire sortirait du cadre des événements acceptables, prévisibles et « identifiés » pour lesquels l'industrie nucléaire a mis en place une réponse générique. Un tel événement, qu'il soit accidentel ou qu'il résulte d'un acte malveillant, serait un véritable choc qui n'avait pas été envisagé ni identifié en tant que menace crédible. Ainsi, la négation du caractère fatal d'une chute d'avion pourrait être considérée comme une défaillance fondamentale de la logique de sûreté nucléaire de l'ASN. En d'autres termes, si aucune mesure ne permet de toute façon de contenir les effets de la chute d'un avion de ligne commercial sur l'une des centrales nucléaires françaises, aussi bien en termes de dommages que de conséquences radiologiques éventuelles, alors pourquoi prendre la peine de se préparer en vue d'un tel événement à fort impact et faible probabilité ?

Les 58 réacteurs français ont été conçus et construits avant que la chute accidentelle d'un avion de ligne ait été identifiée comme une menace réelle. En réalité, au moment où ces réacteurs ont été conçus, les avions de ligne étaient plus petits et le trafic aérien moins dense. La mise en service et l'exploitation commerciale de toutes les centrales françaises sont antérieures aux événements du

¹ <http://www.asn.fr/index.php/S-informer/Actualites/2001/Protection-des-installations-nucleaires>

11 septembre 2001, une date qui a marqué un tournant dans la motivation, le *modus operandi* et l'échelle des conséquences d'un acte terroriste.

Face à ce problème, certains peuvent penser que la chute d'un avion est un événement qui dépasse tout ce à quoi on peut s'attendre, voire impossible ou extrêmement difficile à envisager et auquel les processus de réponse génériques prévus ne sont pas adaptés. Cet argument les conduit inévitablement à défendre l'argument « faible » selon lequel il est quasiment impossible de se préparer à un tel événement.

D'une part, l'ASN semble défendre le point de vue selon lequel un tel événement ne pouvant se produire, il n'appelle peu ou pas de mesures pour en prévenir ou en limiter les conséquences. Cet argument s'applique dans le cas où l'ASN écarterait tout risque de chute accidentelle d'avion, et dans le cas où toute responsabilité est exclue puisque le détournement d'un avion (attaque terroriste) est défini comme étant un acte de guerre. D'autre part, l'ASN semble reconnaître que la chute d'un avion est un événement rare « identifié mais non anticipé », puisque des précautions ont été prises pour des scénarios de chutes moins graves (impliquant un aéronef plus petit et plus léger). Le fait de limiter artificiellement l'échelle d'un tel accident – et, partant, les mesures d'intervention devant être mises en place – rend impossible toute intégration, dès la phase de conception et de planification, de données scientifiques et techniques qui permettraient de conceptualiser le déroulement d'un accident de plus grande ampleur ou induisant des conséquences radiologiques plus graves, et nous contraint, comme c'est le cas aujourd'hui, à faire appel à cette expertise une fois que l'accident s'est produit.

Peut-être plus étrange encore : l'ASN affirme que le crash d'un avion dû à un acte de malveillance constitue un acte de guerre, et exonère ainsi l'exploitant EDF de toute responsabilité en matière de prévention et, le cas échéant, d'atténuation. Mais dans le même temps, l'ASN participe au Groupe ad-hoc sur la sécurité nucléaire (AHGNS) de l'Union européenne, chargé d'analyser les menaces liées aux attaques terroristes dans le cadre du « volet sécurité » (« Security Track ») mis en place en parallèle des stress-tests post Fukushima effectués sur toutes les centrales européennes. D'une part, l'ASN s'exonère et exonère l'exploitant de la nécessité de se préparer à une chute d'avion, estimant qu'il s'agit d'un acte de guerre. Mais, d'autre part, elle continue de participer à un groupe de spécialistes dont la mission consiste notamment à analyser les mesures de prévention et d'intervention à adopter pour faire face à des accidents causés par des actes terroristes ou de malveillance. Par définition, et comme nous l'a montré l'histoire récente, ces actes doivent forcément inclure la chute intentionnelle d'un avion de ligne commercial sur une centrale nucléaire cible.

En résumé : L'industrie nucléaire française (et mondiale) n'ayant jusqu'à présent pas pris en compte de façon réaliste la possibilité d'une chute d'avion sur une centrale, peu d'efforts ont été réalisés pour intégrer, dès la phase de conception, des mesures spécifiques destinées à faire face à un événement « à probabilité extrêmement faible ». Ainsi, les centrales nucléaires françaises (comme les autres) ne sont pas préparées pour affronter une chute d'avion de ligne d'origine accidentelle et, a fortiori, une attaque terroriste venue du ciel. De plus, la conception et la construction des centrales et bâtiments nucléaires datent d'il y a plusieurs dizaines d'années. Aussi, les bâtiments et confinements les plus anciens sont d'autant plus vulnérables à une chute d'avion, un incendie provoqué par les fuites de combustible, une déflagration et une détonation violente près du sol (comme cela a été le cas à Lockerbie). Il faut également tenir compte de la vulnérabilité d'autres éléments apparemment secondaires mais essentiels à la sûreté d'une centrale, situés sur ou hors site, tels que les digues retenant le canal ou le bassin de refroidissement dont la défaillance

pourrait déclencher une réaction en chaîne et, *in fine*, des conséquences radiologiques aussi graves que la défaillance d'une pièce maîtresse.

Chapitre III : Conséquences éventuelles d'une chute d'avion sur une centrale nucléaire française

Deux catégories de défaillance sont examinées :

- A) Impact direct sur un confinement :** pourrait provoquer des fissures sur le confinement et/ou des systèmes et éléments de sûreté clés, générant des risques de rejets radioactifs au niveau de la centrale nucléaire, du combustible usé et/ou d'autres matières et substances radioactives.

- B) Impact sur un bâtiment/élément auxiliaire sur ou hors site :** pourrait entraîner une panne totale de courant, une inondation ou la perte de la dernière source froide, et la centrale ne serait plus à même de se mettre à l'arrêt et de retrouver des conditions sûres et stables, ce qui provoquerait une réaction en chaîne interne : défaillance du confinement, rejets radioactifs et incident radiologique hors site.

La présente étude n'a pas pour objet d'évaluer en détail quelle serait l'ampleur des rejets radioactifs, leur schéma de dispersion ou leurs conséquences radiologiques hors site. Diverses analyses ont déjà été consacrées à ce sujet².

A.1) Impact direct sur le confinement primaire

Les tableaux 4 (col. 10) et 5 présentent les caractéristiques des enceintes de confinement primaire de chacune des centrales nucléaires exploitées en France. Sur les réacteurs de 900 MWe, le confinement primaire en béton précontraint est recouvert d'une paroi intérieure en acier. Les séries de 1 300 MWe et N4 (1 400 MWe) disposent d'une double protection, mais aucune des deux couches n'est en acier.

Les études sur la résistance et la dégradation de l'enceinte de confinement suite à une chute d'avion ne parviennent pas, en général, à refléter la complexité du mécanisme de défaillance qui entre en jeu. De plus, le champ des travaux effectués sur ce sujet avant le 11 septembre 2001 – c'est-à-dire avant qu'on ne se préoccupe des conséquences de la chute d'un avion de ligne – se limitent aux forces d'impact liées à la fonction charge-temps d'un avion léger ou d'un avion de combat Phantom, qu'on extrapole ensuite à la chute d'un avion de ligne commercial. Ces études mettent en évidence la vulnérabilité du confinement primaire à une rupture de part en part dans la zone immédiate de l'impact et à une propagation de la fracture dans la structure de béton armé, à partir du point d'impact. D'après les quelques recherches menées avant le 11 septembre 2001 sur la chute d'un avion de ligne, un tel événement causerait d'importantes fissurations et autres dégâts considérables sur le confinement.

Après le 11 septembre, un certain nombre d'analyses ont été consacrées à la chute d'un avion de ligne sur le confinement primaire d'une centrale. Ces travaux tendent à mettre en évidence une plus grande résistance de la structure. Toutefois, une telle analyse ne semble pas fondée et les résultats reposent parfois sur l'introduction de facteurs d'atténuation (par ex. : dissipation de l'énergie de l'appareil lors de la collision avec des structures « sacrificielles » avant d'atteindre le confinement

² Notamment concernant les catastrophes de Tchernobyl en 1986 et de Fukushima en 2011. Pour l'EPR de troisième génération, voir par exemple : Large & Associates, [Assessments of the Radiological Consequences of Releases from Existing and Proposed EPR/PWR Nuclear Power Plants in France](#), R3159-3, Greenpeace France.

primaire ; vitesses d'impact généralement moins élevées) ou sur des suppositions que certains qualifieraient d'injustifiées (par ex. : la zone de projection de(s) moteur(s) de l'aéronef est importante uniquement dans la composition de charge dynamique ; la chute oblique de l'aéronef sur la structure cylindrique du confinement, etc.).

Qu'elles aient été publiées avant ou après le 11 septembre, aucune étude ne parvient réellement à modéliser toute la complexité d'un crash d'un avion, ni des forces ou des mécanismes qui entrent alors en jeu. Elles ne prennent pas en considération la vulnérabilité particulière du confinement à la chute d'un avion volant à basse altitude avec un faible angle d'approche (Pentagone), l'explosion des boules de feu pouvant se former après l'impact, l'exposition prolongée au feu ou encore la formation de projectiles à partir des débris issus de la désintégration de l'appareil, des éléments et de l'équipement contenus dans le confinement et de l'enceinte de confinement elle-même³.

De plus, toutes les analyses examinées considèrent que le confinement primaire se trouve dans le même état que lors de sa conception. En d'autres termes, elles ne tiennent pas compte des dégradations dues à l'exploitation et/ou au vieillissement des matériaux concernés (béton, acier, armature...). Même si, au cours des dernières années, des progrès ont été réalisés en matière de modélisation et d'analyse informatique des structures en acier, il reste impossible de rendre totalement compte des caractéristiques de la dégradation non linéaire des matériaux (tel que le vieillissement) et des faiblesses dues à l'exploitation (fissures du béton, corrosion des armatures, etc.). Par ailleurs, des défauts plus graves sur des éléments « non remplaçables », tel que le confinement primaire, ont été mentionnés par l'IRSN lors de l'examen de la prolongation de la durée d'exploitation des réacteurs de 900MWe. On ne sait pas si ces défauts existants affecteraient, de par leur nature et/ou leur gravité, la réaction et la résistance du confinement primaire lors d'une chute d'avion.

Dans l'ensemble, au regard de la gravité des dégâts infligés par les attaques du 11 septembre visant le WTC et le Pentagone et par l'attentat de Lockerbie, la chute d'un avion de ligne sur une enceinte de confinement primaire (double ou simple) entraînerait vraisemblablement des ruptures localisées, voire un effondrement catastrophique d'une partie ou de l'ensemble de la structure.

Immédiatement après le crash d'un avion sur une enceinte de confinement primaire, les boules de feu (caractéristiques des trois attaques du 11 septembre) pourraient consommer 1/10^{ème} environ de l'énergie du kérosène transporté à bord de l'appareil. Ces boules de feu, dont la déflagration est de courte durée, ne devraient infliger que des dommages superficiels voire modérés sur la surface externe du confinement. Le carburant restant, formé de fines particules (mélange air/vapeurs combustibles) projetées à grande vitesse hors de l'avion en désintégration, pourrait représenter un risque d'explosion dans l'espace de confinement ou, pour les confinements à double parois (1 300 MWe et N4), dans la cavité située entre les deux parois ; aucune étude n'a été publiée sur ce type de détonation « contenue » malgré ses effets destructeurs potentiels.

En résumé : en cas de chute d'un avion de ligne commercial, les confinements primaires des 58 réacteurs français seraient confrontés à un risque de défaillance.

Certains affirment que ces confinements possèdent une force résiduelle suffisante du fait de leur rôle passif (pression interne) prévu par le dimensionnement. Mais cet argument n'est guère étayé et, en réalité, on pourrait objecter que certaines caractéristiques nécessaires au renforcement du rôle

³ Une analyse plus détaillée de la résistance du confinement primaire et d'autres confinements d'une centrale ne font pas partie du champ de la présente étude.

passif entraveraient ou affaibliraient la réaction du confinement en cas de charge dynamique explosive. On ne sait pas à ce jour si les défauts du confinement primaire des réacteurs de 900 MWe, relevés par l'IRSN, pourraient affaiblir le confinement si celui-ci était soumis à une force dynamique lors d'une chute d'avion.

De plus, l'étendue, l'échelle et l'ampleur des dégâts causés à une centrale en « état A » pourraient engendrer de multiples conditions de défaillance à travers l'ensemble de la centrale, entraînant une condition de fonctionnement RCC-A (catégorie de réduction du risque A), et notamment la perte totale des alimentations électriques (SBO), et la perte du circuit de refroidissement intermédiaire et de la chaîne de refroidissement. Les projectiles (issus des débris de l'aéronef ou générés lors de l'impact) se trouvant dans le confinement primaire, ou l'effondrement d'une structure interne disloquée par l'impact pourraient entraîner un Accident mineur de perte de réfrigérant primaire (APRP), voire la perte des systèmes d'appoint d'eau des circuits réacteurs.

A.2) Impact direct sur les piscines de désactivation ou autre confinements radiologiques

Rare sont les études qui ont été réalisées ou publiées sur la résistance des bâtiments combustibles et, en particulier, sur l'étanchéité continue des piscines de désactivation pendant et après le crash d'un avion. En général, les détails de la conception du bâtiment combustible ne sont pas accessibles. Toutefois, l'ASN a exprimé des doutes quant à la résistance de la structure, les bâtiments combustibles de toutes les centrales (y compris du futur EPR) étant constitués « d'un toit métallique et de murs de béton armé de 300 mm, soit une épaisseur relativement fine ».

Le scénario le plus probable est qu'en s'écrasant sur un bâtiment combustible, un avion perforerait la structure, voire provoquerait son effondrement. Les forces et les charges exercées au cours de la séquence d'impact dépasseraient l'état-limite ultime d'Eurocode 2, la norme de conception applicable aux structures du génie civil telles que les bâtiments combustibles ou d'autres confinements situés à l'extérieur de l'îlot nucléaire.

La perte de l'étanchéité des piscines de désactivation peut être causée soit par la chute d'un projectile qui perforerait le revêtement en acier ou les murs en béton armé (Pentagone), soit par l'explosion du kérosène pulvérulent échappé de l'appareil (Lockerbie), ce qui aurait sans doute des effets plus destructeurs. Quelle qu'en soit la cause, la défaillance de la piscine et son dénoyage découvriraient plusieurs tonnes de combustible hautement radioactif et entraîneraient inévitablement une situation radiologique intolérable et irrémédiable, ce que reconnaît l'ASN : « Pour ce qui concerne les piscines d'entreposage du combustible usé, compte tenu de la difficulté, voire de l'impossibilité, de la mise en œuvre de moyens efficaces de limitation des conséquences d'un dénoyage prolongé des assemblages combustibles, l'ASN imposera à EDF de définir et mettre en place des dispositions renforcées de prévention du dénoyage de ces assemblages.⁴ »

Le site d'une centrale nucléaire abrite d'autres confinements radiologiques. Les observations formulées concernant les bâtiments réacteur et combustible s'appliquent également et à plus forte raison à ces structures, qui ne sont pas traitées en détail dans la présente étude.

En résumé : sur l'ensemble des 58 unités exploitées en France, les bâtiments abritant les piscines de combustible usé sont tous vulnérables à la chute d'un aéronef.

⁴ www.oecd-nea.org/nsd/.../France_ST_Final_National_Report_Fr.pdf, p. 180.

Il a été démontré que des murs de maçonnerie en béton armé de faible épaisseur ne résistent pas à l'impact d'un avion de ligne (cf. Pentagone et Lockerbie). Ainsi, la piscine de désactivation risquerait de perdre son étanchéité et le combustible d'être rapidement dénoyé. Les piscines des 58 réacteurs exploités en France peuvent contenir plusieurs centaines de tonnes de combustible à haute activité, dont la gaine en zircaloy favorise le risque d'explosion d'hydrogène, induisant de graves conséquences radiologiques hors site.

B1.) Impact sur un bâtiment/élément auxiliaire sur ou hors site

Bien qu'elle n'ait pas encore remis de rapport à ce sujet, l'ASN a exigé de la part d'EDF d'évaluer les diverses conséquences d'une chute d'avion (à priori d'un avion commercial) sur certains éléments situés sur et hors site des centrales nucléaires exploitées. Si le cahier des charges détaillé de cette demande n'a pas été rendu public, EDF doit probablement être tenue d'examiner de manière concrète la résistance de certains digues, barrages et réservoirs situés à l'intérieur et à l'extérieur du site de certaines centrales.

Cette demande spécifique concernant les crashes d'avion vient s'ajouter aux Évaluations complémentaires de sûreté (ECS) commandées par l'ASN pour toutes les centrales en fonctionnement ainsi que l'EPR de troisième génération, en cours de construction à Flamanville. Les ECS complètent les tests de résistance (« stress tests ») initiés par la Commission européenne et l'ENSREG (**groupe à haut niveau de l'Union européenne sur la sûreté nucléaire et la gestion des déchets**) actuellement soumis à un processus de revues croisées (« peer review »). L'un des principaux objectifs de ces tests est d'identifier tout événement extrême externe susceptible de déclencher une perte de contrôle et une fusion du combustible, comme cela s'est produit à Fukushima, tant au niveau du cœur du réacteur que dans les piscines de désactivation (ou les deux).

Hormis cette demande spécifique, l'ASN n'admet pas (publiquement tout du moins) que la chute d'un avion de ligne commercial d'origine accidentelle ou intentionnelle soit un événement initiateur crédible. Cette position est contradictoire avec celle de l'ENSREG et de la Commission européenne, exposée dans la « déclaration » (cahier des charges) des stress tests :

*« En outre, l'évaluation des conséquences de la perte des fonctions de sûreté est également pertinente si la situation est provoquée par des événements initiateurs indirects, par exemple, d'importantes perturbations provenant du réseau électrique [...] ou des incendies de forêts ou des **crashes d'avions**⁵. »*

L'ASN confine ce type d'événements initiateurs à d'« autres phénomènes naturels⁶ ». Aussi semble-t-elle exclure les événements d'origine humaine, tels que les crashes d'avions.

Quoiqu'il en soit, le cahier des charges des ECS consiste essentiellement à « mettre à l'épreuve » les marges de sûreté des installations nucléaires face à des phénomènes naturels extrêmes non prévus par le dimensionnement. De plus, la réponse déclenchée par des situations extrêmes doit être évaluée dans le cadre d'une perte séquentielle des lignes de défense en adoptant une

⁵ <http://www.asn.fr/index.php/content/download/31335/209695/file/ENSREG-Stress-Tests-Specifications-vf.pdf>

⁶ <http://www.asn.fr/index.php/S-informer/Actualites/2011/Cahier-des-charges-relatif-aux-evaluations-complementaires-de-la-surete-des-INB>

approche déterministe, indépendamment de la probabilité de cette perte, et en supposant que les mesures mises en place pour gérer et atténuer ces situations sont progressivement mises en défaut.

En d'autres termes, l'ASN demande à ce que la robustesse de la défense en profondeur de chaque installation nucléaire soit testée face à des événements extrêmes extérieurs qui, jusqu'à présent, ont été considérés comme improbables et hors dimensionnement. Il est donc surprenant que l'ASN continue d'exclure la chute d'avion du champ de l'évaluation de la défense en profondeur de toutes les installations nucléaires actuellement exploitées ou susceptibles de l'être dans le futur.

Il est possible d'extrapoler les résultats de certaines ECS à des situations dont l'événement initiateur serait le crash d'un avion. Par exemple, lorsqu'il est spécifié, dans la présentation des ECS, que les « événements initiateurs indirects » peuvent correspondre à des inondations, il serait tout à fait légitime de supposer que cette inondation puisse être causée par la chute d'un aéronef : en s'écrasant, un avion de ligne pourrait détruire la digue retenant la source de refroidissement du condenseur et déclencher ainsi une inondation correspondant à un « événement initiateur externe ». De même, les pertes des systèmes de sûreté induites par un séisme (perte des alimentations électriques, perte de la source de refroidissement ultime, etc.) pourraient résulter de la chute d'un avion si le crash engendre une situation similaire ou plus grave (en nature et en ampleur) que les événements initiateurs extrêmes décrits dans la présentation des ECS. De plus, comme dans le cas de Lockerbie, la perturbation et les dégâts résultant de la chute d'un avion peuvent être très étendus, et l'événement en lui-même est susceptible de déclencher simultanément plusieurs modes de défaillance qui ne sont pas pris en compte dans les dossiers de sûreté, ni dans les scénarios de dysfonctionnements isolés et linéaires prévus dans les ECS.

Cependant, on peut se faire une idée de la capacité de résistance à une chute d'avion des trois filières de réacteurs (voir tableau 4) à partir des résultats publiés dans le cadre des ECS. L'ASN a défini des domaines pour lesquels il s'agit « d'identifier les possibles améliorations de sûreté », et certains cas de figure mentionnés pourraient présenter des points communs (voir tableaux n°6 à 10) avec le scénario d'une chute d'avion tel que décrit ci-dessus.

TABLEAU N°	ECS	POINTS COMMUNS AVEC LE CRASH D'UN AVION	FILIÈRES / CENTRALES
6	SÉISME charge dynamique maximale du crash égale ou supérieure à la contrainte directe ou induite prévue par séisme majoré de sécurité (SMS)	<ul style="list-style-type: none"> i) Les charges dépassent les règles fondamentales de sûreté du dimensionnement des systèmes de protection incendie, qui risquent d'être partiellement ou totalement mis hors service suite à la chute. ii) L'endommagement ou la destruction des structures visant à contenir les crues (vannes, barrages, déversoirs, etc.) entraînent la perte à long terme de la dernière source froide. iii) Robustesse insuffisante du dimensionnement du compartiment réacteur, du refroidissement du combustible usé, et des valves WCS. iv) Les charges générées par l'impact endommagent les réservoirs d'eau situés sur le site, entraînant une inondation et la perte rapide des systèmes de sûreté de l'îlot nucléaire. 	<p>Toutes les centrales</p> <p><i>Tricastin, Fessenheim et Bugey</i></p> <p>Toutes les centrales</p> <p><i>Gravelines et d'autres centrales non identifiées</i></p>

7	<p>INONDATION</p> <p>l'avion s'écrase sur un ouvrage soutenant une digue, provoquant une inondation sur le site</p>	<p>i) Endommagement / destruction des digues, barrages, réservoirs sur des sites dont les îlots nucléaires se situent en-dessous du niveau de crue (<i>Tricastin</i> and <i>Fessenheim</i> en particulier). <i>Tricastin</i> : les ouvrages de protection ne résisteraient pas à une crue importante. <i>Fessenheim</i> : une mise en défaut des digues du Grand Canal d'Alsace entraînerait une arrivée d'eau sur le site, avec la possibilité d'une perte totale de l'alimentation électrique externe et interne, ainsi que la perte d'autres installations de l'îlot nucléaire.</p> <p>ii) La chute d'un avion sur l'une des aéroréfrigérants pourrait entraîner l'effondrement des tours adjacentes ; une inondation localisée pourrait affecter le fonctionnement des groupes électrogènes de secours internes qui, d'après l'ASN sont vulnérables aux inondations.</p>	<p><i>Tricastin</i> et <i>Fessenheim</i> en particulier, mais aussi <i>Bugey</i>, <i>Civaux</i>, <i>Cruas</i>, <i>Nogent</i>, <i>St Alban</i></p> <p>Toutes les centrales équipées d'aéroréfrigérants ; l'ASN attend les rapports des ECS en 2012</p>
8	<p>PERTE DE L'ALIMENTATION ÉLECTRIQUE</p> <p>la perte des sources électriques externes et internes pourrait être causée par une combinaison d'actes de malveillance (déconnexion de l'arrivée du courant) et la chute d'un avion directement sur le site, ce qui mettrait hors service les générateurs d'urgence</p>	<p>i) En cas de perte du groupe électrogène d'un réacteur, le refroidissement du cœur du réacteur et du combustible doit continuer à être assuré, ce qui nécessite l'activation d'un groupe électrogène d'ultime secours (SBO) d'un réacteur voisin situé sur le même site. Si tous les SBO se trouvent simultanément hors d'état de fonctionner, et que le groupe électrogène à moteur diesel d'ultime secours (GUS pour les réacteurs 900 MWe) ou la turbine à combustion (TAC pour les réacteurs 1 300 MWe et N4) sont également mis en défaut suite aux dommages considérables causés par une chute d'avion, le temps pendant lequel le combustible est protégé est ramené à quelques heures (moins de 10 heures) pour les séries 900 MWe, à quelques jours pour les filières 1 300 MWe et N4 et à quelques heures (donnée non précisée) pour l'EPR.</p> <p>ii) Pour les réacteurs 900 MWe et 1 300 MWe/N4 NPPs, le délai avant découverture du cœur est inférieur au délai de mise en œuvre des moyens de la Force d'Action Rapide Nucléaire (12 à 14 heures), qui n'est pas encore totalement finalisée.</p> <p>iii) Concernant un réacteur dont le contenu du cœur a été complètement transféré dans les piscines de désactivation, le délai avant recouvrement du cœur déchargé est de 10 heures à partir du début de la perte du refroidissement de la piscine.</p>	<p>La filière 900 MWe est particulièrement vulnérable à une fusion du combustible en quelques heures (donnée non précisée)</p> <p>Notamment pour les réacteurs 900 MWe ; l'ASN a demandé à EDF d'installer un diesel d'ultime secours (DUS) ainsi qu'un générateur de secours plus petit dans le cas d'une perte totale de l'alimentation électrique</p>
9	<p>PERTE DE LA DERNIÈRE SOURCE FROIDE</p> <p>une chute d'avion pourrait déclencher un ou plusieurs scénarios (inondation, perte de la prise d'eau de refroidissement,</p>	<p>i) L'ASN reconnaît que la source froide pourrait être « sérieusement endommagée », obligeant EDF à envisager une perte simultanée de la source froide et de l'alimentation électrique (H1+H3).</p> <p>ii) Nous n'avons pas assez d'informations sur les niveaux de redondance et de diversification de prise, de distribution (et d'évacuation) de la dernière source froide (d'eau) sur un site nucléaire pour évaluer les affirmations d'EDF selon lesquelles l'entreprise est en mesure de remédier à toutes les situations possibles de type H1 avant le découverture du combustible (du cœur et/ou des piscines) d'une seule tranche ou de</p>	<p>Les évaluations des situations H1 et H3 n'ont pas encore été remises par EDF</p> <p>Toutes les centrales en cas de situation H1 sur l'ensemble du site</p>

	<p>perte de l'alimentation électrique) conduisant à la perte de la source froide ultime</p>	<p>toutes les tranches d'un site donné. Le délai avant découverte du combustible est estimé à quelques jours tant pour le cœur que pour les piscines de désactivation Cependant, l'ASN suppose que le cœur des réacteurs (900MWe, 1 300 MWe et N4) pourrait être découvert « en quelques heures seulement » en cas de situation H1 touchant l'ensemble du site.</p> <p>iii) EDF et l'ASN semblent restreindre l'évaluation des situations H1 aux cas où la source est temporairement hors service en raison d'un blocage, d'une défaillance localisée, etc., sans prendre en compte les situations qui ne peuvent être facilement ou immédiatement corrigées ; une perte irrémédiable pourrait être causée par la chute d'un avion directement au niveau de l'arrivée ou de la sortie de la source froide.</p>	
10	<p>SITUATION CONSÉCUTIVE À L'ACCIDENT</p> <p>Dans le cadre de la gestion post-incident, EDF ne met pas en œuvre suffisamment de ressources et la réponse n'est pas assez flexible pour faire face aux diverses conséquences d'une chute d'avion sur un site nucléaire ; l'ASN a identifié des lacunes concernant les mesures d'intervention et d'atténuation, notamment au niveau de la piscine de désactivation</p>	<p>i) Les plans d'intervention d'urgence ne disposent pas d'assez de ressources pour faire face à un événement touchant diverses installations, ce qui serait le cas si un avion s'écrasait.</p> <p>ii) L'environnement des piscines a été dimensionné en fonction du séisme majoré de sécurité (SMS), et donc la structure et le confinement n'ont pas été mis à l'épreuve face à la charge qu'exercerait la chute d'un avion ou de projectiles et qui pourrait i) fissurer le confinement, ii) provoquer la rupture de la piscine et des canalisations d'eau, iii) générer des projectiles.</p> <p>iii) La baisse du niveau d'eau des piscines de désactivation, et la formation de brèches dans les murs et/ou le toit entraîneraient un niveau élevé d'irradiation par retour des rayons gamma (« effet de ciel »), au fur et à mesure que le niveau d'eau recouvrant le combustible diminue. Cette situation, qui pourrait être provoquée par la chute d'un avion directement sur le bâtiment combustible, gênera l'intervention du personnel de secours qui devra réguler la vapeur pour empêcher que le zircaloy ne libère de l'hydrogène.</p> <p>iv) Le bâtiment combustible de toutes les installations nucléaires (y compris du futur EPR) comporte un toit métallique et des murs en béton armé relativement fins (300 mm d'épaisseur). Ces deux éléments ne résisteraient pas à une chute d'avion, et toute fissure du confinement laisserait filtrer, à partir des assemblages combustibles découverts, des rayons gamma et des rejets de particules radioactives, lorsque le combustible et son revêtement sont en état de surchauffe (~1 000°C) et endommagés.</p>	<p>Toutes les centrales</p>

En résumé : souvent, la définition réglementaire et la détermination de la sûreté nucléaire se concentrent sur les défis extérieurs auxquels peuvent être confrontés l'îlot nucléaire et, en particulier, le confinement primaire contenant le réacteur. Toutefois, certains types d'événements extérieurs peuvent avoir des conséquences sur l'ensemble d'une installation nucléaire (séisme) ou sur certaines zones du site, y compris l'îlot nucléaire (inondation). D'autres événements, qu'ils soient accidentels ou intentionnels, peuvent affecter certains dispositifs du site en particulier. La chute

d'avion, qu'elle soit accidentelle ou due à un acte de malveillance, appartient à cette dernière catégorie d'événements initiateurs externes.

La fusion du combustible et les rejets radioactifs qui se sont produits à Fukushima en mars 2011 ont été indirectement entraînés par un séisme sous-marin, et de façon plus directe par le tsunami qui s'en est suivi, dont les vagues ont inondé le site de Daiichi. La défaillance du réseau électrique sur et hors installation, ayant induit une perte prolongée de l'alimentation électrique du site, une perte du circuit de refroidissement des réacteurs (alors à l'arrêt) et la surchauffe du cœur combustible, a abouti à l'explosion et à la destruction de la cuve et de l'enceinte de confinement primaire. En d'autres termes, lorsqu'un événement provoque des dommages, des perturbations, la défaillance ou la perte de contrôle de certains systèmes essentiels d'une installation nucléaire, les réacteurs peuvent littéralement détruire leurs propres structures de confinement, même s'ils sont mis à l'arrêt.

Les ECS menées par l'ASN sur les 58 réacteurs actuellement exploités en France montrent que ces centrales sont également vulnérables aux événements externes survenant à distance des bâtiments réacteur et combustible. Elles révèlent également que, comme à Fukushima, on ne dispose que de délais très courts, parfois de quelques heures à peine, pour remédier à une situation radiologique détériorée consécutive à un événement initiateur extrême se produisant sur et/ou hors site. Fait inquiétant, les ECS nous apprennent aussi qu'EDF n'a pas prévu de plans d'intervention suffisamment exhaustifs, qui permettraient de faire face de façon adéquate à un événement touchant plusieurs installations et à reprendre le contrôle d'un site.

Il est certain que la chute d'un avion de ligne commercial sur le site d'une centrale nucléaire pourrait causer des dégâts d'une ampleur considérable et divers dysfonctionnements sur l'ensemble de l'installation, ce qui entraînerait la perte séquentielle des lignes de défense sur l'un ou plusieurs tranches. En l'absence de toute préparation, la chute d'un avion de ligne sur une centrale nucléaire pourrait mettre en échec les contre-mesures prévues, empêchant ainsi la mise en œuvre effective des mesures immédiates d'atténuation et entraînant une situation chaotique qui pourrait déboucher sur des conséquences radiologiques catastrophiques.

JOHN H LARGE
LARGE & ASSOCIATES
CONSULTING ENGINEERS, LONDON