



# **Synthèse de l'évaluation de l'action PIA ASTRID**

## 1. Un projet financé via le PIA, mais dont l'origine relève d'enjeux spécifiques en lien avec les ambitions françaises d'accès aux technologies de 4<sup>ème</sup> Génération

### 1.1 Le programme ASTRID au sein du PIA : un projet inscrit dès le démarrage dans la logique de préparation de la compétitivité technologique française de long terme sur les technologies nucléaires

L'action ASTRID, financée dans le cadre du PIA de 2010 à 2019, avait pour objectif de conduire les études de conception d'un **prototype industriel de réacteur à neutrons rapides au sodium ("RNR-Na") de 4<sup>ème</sup> génération ("4G")**. Un RNR-Na **diffère fortement des réacteurs nucléaires actuellement en exploitation commerciale** : ainsi, leur principe de fonctionnement permet de **valoriser en quasi intégralité** le potentiel énergétique du minerai d'uranium, **multipliant** potentiellement par un **ordre de 100 l'énergie** pouvant être produite à partir d'un kilo d'uranium. Ces réacteurs offrent également la possibilité de **réemployer les matières nucléaires** présentes dans les **combustibles usés du parc nucléaire français** actuel.

Plus précisément, ASTRID avait pour but essentiel de **qualifier des options innovantes** dans les domaines de la **sûreté** et de l'**opérabilité**. Ce programme devait ainsi permettre à la France de disposer de **l'ensemble des éléments nécessaires** afin d'être prête pour un **déploiement industriel des RNR-Na à partir de 2040**, en fonction notamment de sa politique énergétique, de ses capacités de gestion des combustibles usés, et de l'état prévu des ressources en uranium naturel.

Le programme ASTRID relève donc d'une logique **d'innovation à très long terme**, trouvant son origine dans les **enjeux spécifiques** de la **filière nucléaire française**. Ceux-ci ont historiquement été portés par une **forte volonté politique**, celle de l'ancien **Président Jacques Chirac** qui annonça le 5 janvier 2006 le lancement de la conception au sein du CEA d'un **prototype de réacteur 4G** – objectif repris par la **loi du 28 juin 2006** relative à la **gestion durable** des matières et déchets radioactifs. Au titre de la LFR 2010, **900 m EUR** furent attribués au CEA dans le cadre du PIA afin de lui **donner les moyens financiers** et la **visibilité nécessaires** sur plusieurs années, se répartissant entre **651,6 m EUR** (montant ajusté ultérieurement à **626,6 m EUR**) pour le prototype industriel de démonstrateur du réacteur 4G (**programme ASTRID**) et **248,4 m EUR** pour le projet de **réacteur Jules-Horowitz**.

### 1.2 Un programme s'inscrivant dans un contexte international et technologique spécifique, et qui a pu bénéficier de financements variés

Le développement de cette nouvelle génération de RNR-Na était concomitant au **niveau international** avec le lancement d'un **grand nombre de programmes nucléaires** dans différents pays (Chine, Inde, Etats-Unis, etc.), générant une forte **hausse des prix de l'uranium**, rendant stratégique une **autosuffisance française** concernant l'approvisionnement de combustibles nucléaires et par conséquent renforçant l'attractivité de cette technologie. En effet, alors que les réacteurs actuellement en exploitation fonctionnent à partir d'un uranium que notre pays doit importer, les RNR-Na sont **capables d'employer des matières déjà présentes sur le sol français**, ce qui aurait permis de **garantir** sur le long terme **l'indépendance énergétique nationale**. Le **programme** a su rapidement s'orienter vers **quatre axes prioritaires**, qui ont servi à la définition des **priorités de conception du réacteur** par rapport aux générations précédentes : la conception d'un **cœur performant à sûreté améliorée**, une résistance accrue aux **accidents graves** et aux **agressions externes**, la recherche d'un **système de conversion d'énergie** optimisé et sûr et enfin des **options de conception du réacteur** pour faciliter l'inspection et la maintenance.

Le programme ASTRID s'inscrit dans la logique du **développement** de centrales nucléaires 4G. Les bases de la réflexion sur ces systèmes nucléaires avancés ont été jetées par le **Forum international Génération IV (GIF)**, groupe de travail de **14 pays** lancé en **2000** à l'initiative des Etats-Unis et en charge d'étudier les **systèmes nucléaires du futur**. Depuis 2011, le GIF a sélectionné **six filières prioritaires** dont les réacteurs pourraient entrer en service à **l'horizon 2030**. Parmi ces dernières, il est à noter que les RNR-Na sont l'option technologique la plus mature, bénéficiant d'une expérience cumulée de près de **400 années de fonctionnement**. Actuellement, des projets de ce type de réacteur sont à l'étude ou en phase de construction en **Russie**, en **Chine** et en **Inde**. Le programme ASTRID a **conforté la place de la France** comme **pionnier des RNR-Na**, lui permettant de se maintenir dans le **club très fermé** des pays maîtrisant les technologies nucléaires 4G.

Au terme du programme ASTRID, **608 m EUR (TTC)** des crédits mobilisés par l'Etat ont été **utilisés** ce qui représente **97%** du total de **l'enveloppe ajustée du PIA** (contre une moyenne de **48% à fin 2018** pour les autres actions du PIA 1). Ce programme a bien plus efficacement employé les fonds mis à sa disposition grâce au **double rôle de coordinateur et de bénéficiaire des financements** joué par le **CEA**. Le programme ASTRID a été financé à hauteur de près de **1,2 Mds EUR** via les modalités suivantes : **subventions accordées par l'Etat** de manière régulière au CEA (**218 m EUR**) ; **ligne dédiée du PIA (608 m EUR)** ; **co-financements perçus par le CEA** au cours du programme (**88 m EUR**) ; apport financier des

**partenaires industriels** et de **R&D (307 m EUR)**. On constate ainsi un **effet de levier de l'ordre de 30%**, en prenant en compte **l'ensemble des apports de ces différents partenaires** par rapport aux **subventions et contributions étatiques**.

**Plusieurs facteurs conjoncturels mais aussi propres à ASTRID** sont intervenus **progressivement** pendant le programme et ont finalement abouti à la décision de ne pas poursuivre le projet : la **dégradation de la perception du nucléaire** par l'opinion publique (suite à l'accident de Fukushima), le questionnement sur le **développement du nucléaire** par rapport à d'autres sources d'énergie et l'abondance de la ressource uranium en regard de sa consommation traduite par une forte baisse des **prix de l'uranium**.

## 2. Un programme ambitieux techniquement, basé sur un modèle partenarial et qui a permis de faire considérablement progresser la filière française des RNR-Na

### 2.1 L'analyse de la complexité des dimensions techniques du programme permet de comprendre la richesse des effets générés par ASTRID

Ce programme s'est composé de **6 sous-projets**, dominés par la conception du prototype et des installations technologiques : la conception du réacteur ASTRID lui-même, avec la volonté d'aller jusqu'à une phase d'**avant-projet détaillé** ; la conception de **l'Atelier de Fabrication des Combustibles** ; la **réalisation** et la **rénovation d'installations technologiques** associées de qualification des composants ; la **rénovation de la maquette critique** de qualification du cœur d'ASTRID ; le **programme relatif à la sûreté et aux accidents graves**, notamment dans le cadre de programmes internationaux ; les **études de faisabilité** de **l'Atelier de Fabrication des Assemblages** chargés en actinides mineurs (ALFA).

La conception du réacteur au sein du programme ASTRID s'est séquencée en **plusieurs phases successives**, visant à progressivement définir les différentes **options technologiques clés** du réacteur, à préciser son design et enfin à **ajuster les estimations de coût de construction** d'une première version du **démonstrateur**. Celui-ci était destiné à tester à une échelle suffisante les **avancées technologiques obtenues**, en qualifiant au cours de son fonctionnement les options innovantes (notamment dans les domaines de la sûreté et de l'opérabilité) en vue de **soutenir la conception et le déploiement de réacteurs commerciaux 4G** au cours du 21<sup>ème</sup> siècle. Pendant le programme, trois configurations majeures du prototype ont fait l'objet d'un remontage complet : **ASTRID 600 Vapeur**, terminé en **2015** à la fin de phase d'avant-projet sommaire ; **ASTRID 600 Gaz**, configuration à un niveau d'**APD partiel à fin 2017** ; **New ASTRID** (ou **ASTRID 150**), configuration à l'état d'esquisse à **fin 2019**.

Un **cycle du combustible** devait être associé au prototype de RNR-Na de façon à **considérer les performances d'ensemble de la filière**. Aussi, les installations clés liées à ce cycle telles que **l'Atelier de Fabrication du Combustible** et les **installations de retraitement de combustible irradié** ont été prises en compte dans le programme ASTRID, en collaboration avec **AREVA NC** (aujourd'hui **ORANO**). Les actions relatives au cycle avaient pour principaux **objectifs** de permettre **l'approvisionnement du démonstrateur en combustible**, de prendre en compte le **combustible déchargé** et de préparer les **expériences de transmutation** faisant partie des missions du programme.

De plus, ce programme a permis le financement de **la remise à niveau de grands équipements de R&D** et de **qualification technologique**, en particulier concernant les **composants du réacteur et du cœur d'ASTRID**. Le CEA a ainsi lancé dans ce cadre les études et la réalisation des installations suivantes pour répondre à ces **besoins de qualification et de R&D** : plateforme **PAPIRUS** ; plateforme **GISEH** ; projet d'installation **CHEOPS** ; projet de rénovation de l'installation **MASURCA** ; projet d'installation **PLINIUS** ; plateforme technologique **HERA**.

ASTRID a également stimulé le **développement de nouvelles méthodes de travail** pour l'ensemble de la filière nucléaire française, avec la mise en œuvre de **méthodologies en rupture** avec les **générations précédentes** de design de réacteur nucléaire. Ainsi, le CEA et ses partenaires ont fait le choix de déployer de **nouveaux modes de management** (visualisation et cartographie 3D, salles immersives, ...), des **outils de gestion innovants**, etc. L'ensemble de ces **méthodologies d'innovation** peuvent être mobilisées pour **assister le déploiement d'autres projets** dans le nucléaire (ex : projet Small Modular Reactor, EPR de Flamanville)

Ce programme s'est appuyé pendant tout son déroulé sur le développement de **nouveaux Outils de Calcul Scientifique** ("OCS") de pointe. En effet, les outils à disposition au début du programme étaient pour la plupart **obsolètes**, car développés il y a **plus de 20 ans** et disposant donc de capacités prédictives parfois limitées. L'objectif du CEA était donc de pouvoir disposer **d'outils performants et opérationnels** pour les besoins des **études de conception**, prenant en compte les **nouvelles exigences réglementaires** apparues dans un contexte post Fukushima et limitant les **conservatismes** à l'origine

de **surcoûts parfois conséquents**. Au total, près de **42 OCS** ont été **développés** et / ou **enrichis**, renouvelant l'**ensemble des codes de calcul** nécessaires au design des réacteurs nucléaires RNR-Na.

## 2.2 Une organisation efficace, fondée sur un modèle partenarial ainsi que sur la mobilisation de nombreux sous-traitants via les financements du PIA

En termes d'organisation, ce projet s'est inscrit pour le CEA dans la **même démarche** que les **autres programmes de recherche** sur les réacteurs 4G, avec un alignement en termes de **standards de management** et de **pilotage**, un **suivi financier** selon des **processus similaires** et une déclinaison classique en **laboratoires / services / départements**. La spécificité d'ASTRID concerne le rôle de la **Cellule Projet ASTRID (CPA)**, créée pour pouvoir gérer le **dimensionnement d'un nouveau type de RNR-Na** et répondre spécifiquement au choix fait par le CEA d'assurer le rôle **d'ensemblier**. Le **bilan du modèle organisationnel** au sein du CEA est **très positif** selon les différents interlocuteurs interrogés, avec un dispositif projet intégré permettant de **mobiliser rapidement** l'ensemble des **compétences techniques nécessaires**.

Ce programme a permis une large mobilisation de partenaires, via l'adoption au cours du programme de **nombreuses contractualisations bilatérales** avec différents acteurs présentant des expertises très variées (sur des périodes de 3 ans renouvelables). Cette configuration a permis au CEA de **bénéficier de compétences de premier rang** aussi bien en France qu'à l'étranger, et de s'ouvrir à d'autres visions concernant le **design** du prototype ASTRID. Les **partenaires industriels suivants** ont été mobilisés : EDF, Areva / Framatome, Ariane Group, Alstom / General Electric, Bouygues, CNIM, ONET Technologies, ALCEN / SEIV, NOX, Technetics, Velan, Rolls Royce.

L'action ASTRID a également su nouer des **partenariats internationaux d'ampleur**, fait rare dans la filière nucléaire. Les deux industriels en dehors de l'Union Européenne concernés sont **japonais**, à savoir la **JAEA** (Japan Atomic Energy Agency) et **Toshiba**. Il s'agit de la **première collaboration inter-étatique sur des sujets de nucléaire civil** (hors problématiques liées à la **sûreté** et / ou à la **non-prolifération**).

Enfin, ASTRID a mobilisé des partenariats de recherche significatifs à travers 3 volets : un réseau de **coopérations bilatérales** avec un certain nombre d'acteurs (**réseau ARDECo**), des **contrats de collaboration de R&D** avec les **laboratoires de différentes universités** et la **réponse à des appels à projet de l'Union Européenne** en commun avec d'autres partenaires.

~**600 m EUR** de flux financiers du PIA ont été dépensés dans le cadre d'ASTRID (dont près de **94,8% en France**), avec des impacts sur de nombreux **acteurs et territoires**. Cette **polarisation** des dépenses sur la France traduit à la fois l'**autonomie forte** de la **filière nucléaire nationale**, mais aussi un choix assumé de la part du CEA de **développement des compétences d'acteurs français** sur des problématiques clés. Par ailleurs, on constate une grande **diversité géographique** des territoires mobilisés pendant le programme, via notamment l'utilisation de **nombreux sous-traitants locaux** par les différents partenaires et le recours par le CEA à des **expertises spécifiques** (en termes de compétences et / ou de matériel) **disséminées sur l'ensemble du territoire**. Néanmoins, **3 régions** concentrent **95% de ces flux financiers** : **Auvergne-Rhône-Alpes** (56,1% du total), **Ile-de-France** (29,3% du total) et **Provence-Alpes-Côte d'Azur** (8,9%) – reflétant la carte industrielle de l'industrie nucléaire française

En termes de répartition des flux financiers par secteur d'activité, **35% des dépenses du programme** ont été à destination **d'autres secteurs que le nucléaire**, ce qui traduit le fait que le programme a eu des effets économiques sur de **nombreux pans de l'économie française** (mécanique et matériaux, chimie et sciences du vivant, bâtiments et infrastructures, etc.).

## 3. Un programme qui a su atteindre ses objectifs et qui, au-delà de plusieurs points d'amélioration potentiels, a pu générer de nombreuses externalités positives

### 3.1 ASTRID a su atteindre l'ensemble des objectifs qui avaient été fixés dans sa convention

**Quatre indicateurs de performance** clairs et objectifs ont été définis dans la convention du programme, à savoir : le **respect de l'échéancier** des études de conception du réacteur ASTRID et des coûts associés ; le **taux de participation des partenaires** au financement du programme ASTRID ; la proposition d'un **dispositif de rémunération par les industriels** sur toute exploitation des différentes innovations ; la **création d'un plan de financement** pour la phase de réalisation d'ASTRID et l'identification de **partenaires pertinents**. En l'**absence de construction** d'un démonstrateur en France dans les années suivant la fin du programme, l'indicateur relatif à la **conception d'un plan de financement** et à l'**identification des partenaires** pour la phase de réalisation d'ASTRID fut abandonné. Il a été remplacé par l'obligation pour le CEA de veiller à **capitaliser l'ensemble des connaissances** générées.

Une analyse du suivi des **différents indicateurs de performance** de la convention initiale montre que le programme a pu dans l'ensemble **atteindre les buts** qui lui avaient été attribués. Ainsi, ASTRID a su **respecter l'échéancier des études de conception** du réacteur et des **coûts associés** des phases AVP1 et AVP2. De plus, en analysant de manière transversale **l'ensemble des financements du programme**, on constate que l'effet de levier moyen au cours du projet fut de l'ordre de 30%, en ligne avec les objectifs requis dans la convention initiale du projet. Toutefois, la proposition d'un **dispositif de rémunération par les industriels** est encore en cours de réalisation. Enfin, l'obligation de **capitalisation** des connaissances faite au CEA a bien été mise en œuvre, passant par la réalisation d'un **dossier de fin de convention** servant d'**outil de recueil et de conservation** des savoirs et expertises développés de 2010 à 2019.

### 3.2 Au-delà des impacts directs, des externalités significatives tout au long du programme

Le programme ASTRID a généré de nombreuses externalités :

1) Il a permis une **forte stimulation de la croissance de notre pays**, avec près de **95%** de ses dépenses dirigées vers des entreprises françaises. En analysant **l'ensemble des financements** de ce programme (pour un total de **~1,2 Mds EUR**), la modélisation effectuée montre que cette action du PIA 1 a généré un **impact PIB cumulé potentiel de l'ordre de 2,3 Mds EUR à l'horizon 2030**, un **effet retour pour les finances publiques** de près de **1,4 Mds €** pour cette même échéance et **~2.150 emplois créés / maintenus chaque année de 2010 à 2029** (notamment en raison de la concentration des dépenses sur des entreprises française).

2) ASTRID a maintenu la France parmi les **acteurs de référence** sur le sujet du développement de **technologies innovantes** concernant les **réacteurs nucléaires 4G** – générant de ce fait de **nombreuses externalités en lien avec l'innovation**, à savoir notamment : le dépôt de **67 brevets**, la découverte de **multiples innovations** par le CEA et ses différents partenaires, la stimulation des **installations et équipements de recherche** et enfin le **maintien / la remobilisation d'effectifs de R&D** au CEA ainsi que chez les partenaires et sous-traitants de ce projet.

3) Le programme a renforcé la **compétitivité** et la **performance** des différentes entreprises impliquées **via 5 principales retombées** : un **renforcement de leur attractivité** en tant qu'employeurs ; la conception et la mise en œuvre de **nouvelles méthodes de travail**, diffusées à l'ensemble de ces entreprises ; le **développement** et **l'harmonisation** entre acteurs de **logiciels et outils innovants** ; la possibilité pour certains partenaires spécialisés sur le nucléaire de **maintenir des économies d'échelle** (en particulier celles en lien avec les différentes problématiques des RNR-Na) ; l'accès à la **filière nucléaire civile** pour les nouveaux entrants dans le secteur du nucléaire, ainsi qu'à de **nouveaux contrats / autres domaines d'activités** pour les industriels déjà présents dans ce secteur.

4) ASTRID a engendré de nombreuses externalités en termes de capital humain pour la filière des RNR-Na à travers **5 facteurs** : la réalisation de plus de **1.500 formations** ; la remobilisation de **savoir-faire et de compétences autour des RNR-Na** via les financements du programme, qui ont permis d'irriguer **l'ensemble de la filière nucléaire** ; la publication de plus de **1.350 articles scientifiques** ; la génération de **nombreuses publications dans le cadre de congrès** dédiés aux RNR-Na, permettant une montée de la visibilité et du rôle de notre pays ; le recours à de **nombreux sous-traitants en ingénierie**, qui ont pu développer leurs expertises grâce au programme.

5) Les technologies développées au cours d'ASTRID ont permis des avancées majeures en termes **d'environnement** : d'une part en identifiant des solutions pour améliorer la **sûreté nucléaire** des **futurs réacteurs 4G** (en particulier concernant la gestion des accidents graves). D'autre part parce que les RNR-Na représentent à long terme une opportunité technologique majeure pour la **production d'énergie décarbonée**, mais aussi l'une des plus abouties pour le **traitement/recyclage des matières issues des combustibles usés de nos centrales**.

6) Le programme ASTRID a permis une **forte structuration** non seulement de l'écosystème du CEA et du nucléaire français, mais aussi de **celui entre Etats sur le sujet du nucléaire 4G**. Ainsi, il a permis de **pérenniser un certain nombre de partenariat** entre le **CEA et différents acteurs** sur des sujets liés non seulement aux RNR-Na mais également à d'autres programmes de recherche. Il a également **renforcé les liens entre les différents partenaires du programme** et leurs **sous-traitants**, via leur travail collaboratif et leur implication dans le chantier majeur que représentait ASTRID. Enfin, il a **stimulé la collaboration inter-étatique** sur de nombreuses problématiques liées aux réacteurs 4G (cf. approfondissement de la **collaboration franco-japonaise**).