



Evaluation de l'action PIA ASTRID

Version publique du rapport

Paris, le 13 mars 2020

Tables des matières

1. Un projet inscrit dans le financement PIA, mais dont l'origine relève d'enjeux spécifiques en lien avec les ambitions françaises d'accès aux technologies de 4 ^{ème} Génération	5
1.1 Le programme ASTRID au sein du PIA : un projet inscrit dès le démarrage dans la logique de préparation de la compétitivité française de long terme	6
1.1.1 ASTRID représente 3% du financement du PIA 1	6
1.1.2 ASTRID relève d'une logique propre à l'histoire de la filière nucléaire française.....	7
1.1.3 ... Et répond à un enjeu, critique au début des années 2010, de fermeture de cycle du combustible	9
1.1.4 Un programme avec des orientations stratégiques tiraillées entre deux objectifs, mais qui a su rapidement prioriser des axes de R&D.....	9
1.1.5 Le retournement progressif du contexte économique causa la non-extension du programme à sa phase suivante	10
1.2 Avec ASTRID, la France se maintient dans le club très fermé des pays maîtrisant les technologies nucléaires de 4 ^{ème} génération	11
1.2.1 Au sein des réacteurs de 4 ^{ème} génération, les RNR-Na sont l'option technologique la plus mature	11
1.2.2 Le programme ASTRID a conforté la place de la France comme pionnier des RNR-Na	13
1.3 Des financements consommés, qui ont pu être diversifiés via notamment un effet de levier significatif	15
1.3.1 L'action ASTRID a consommé 97% de son enveloppe, contre 48% en moyenne pour les différentes actions du PIA 1 (à fin 2018).....	15
1.3.2 Des sources de financement diversifiées	16
1.4 Des indicateurs de performance clairs et objectifs ont été définis dans la convention du programme	18
2. Un projet ambitieux et techniquement en pointe	20
2.1 L'analyse de la complexité des dimensions techniques du programme permet de comprendre la richesse des effets générés par ASTRID	20
2.1.1 6 sous-programmes, dominés par la conception du prototype et des installations technologiques	20
2.1.2 Un programme avec différentes phases de conception du réacteur	21
2.1.3 Des évolutions de configurations techniques auxquelles le CEA a su s'adapter	22
2.1.4 Une mutualisation des efforts du CEA et de ses partenaires (notamment Orano) sur le cycle et l'atelier de fabrication du combustible	24
2.1.5 ASTRID a permis de développer différentes plateformes et installations	25
2.1.6 ASTRID a stimulé le développement de nouvelles méthodes de travail pour l'ensemble de la filière nucléaire française	26
2.1.7 Un développement de pointe sur les Outils de Calcul Scientifique	29
2.2 Une organisation efficace, fondée sur un modèle partenarial	32
2.2.1 Une organisation souple au sein du CEA, qui a permis de mobiliser de nombreuses ressources internes tout en gérant les interfaces avec les partenaires	32



2.2.2 Une large mobilisation de partenaires	34
2.3 ~600 m EUR de flux financiers dépensés dans le cadre du PIA (avec une forte orientation vers la France), qui ont eu un effet sur une large typologie d'acteurs et de territoires	40
2.3.1 ASTRID a concentré ses efforts dans la structuration d'une filière française cohérente, avec des bénéfices pour de nombreux territoires	40
2.3.2 ASTRID a bénéficié à hauteur de ~50 / 60% à des acteurs de la filière nucléaire, permettant de développer celle-ci	43
2.3.3 Un tiers des dépenses portent sur des postes diversifiés, qui vont au-delà des études dans le domaine nucléaire	45
2.3.4 De nombreux partenaires et acteurs mobilisés, avec 30% des financements orientés vers les ETI, PME et TPE	46
2.3.5 Un examen croisé des différents types de structurations des flux financiers permet d'offrir un éclairage plus poussé de certains indicateurs	47
2.4 Les impacts de l'action ASTRID sont diversifiés et vont au-delà du nucléaire	52
2.4.1 Le schéma de causalité démontre des effets significatifs, à la fois sur la sécurisation de la filière RNR, mais aussi au-delà	52
2.4.2 L'évaluation et le traitement des sous-éléments de ce schéma permet de catégoriser une grande partie des différentes externalités du programme	55
3. Un programme qui a su atteindre ses objectifs et qui, au-delà de plusieurs points d'amélioration potentiels, a généré de nombreuses externalités positives	58
3.1 ASTRID a su dans l'ensemble atteindre les objectifs fixés dans sa convention	58
3.1.1 Le programme a su respecter l'échéancier des études ainsi que les coûts projetés de conception du réacteur	58
3.1.2 Un effet de levier en ligne avec les objectifs attendus	59
3.1.3 La proposition d'un dispositif de rémunération par les industriels est encore en cours de réalisation	59
3.1.4 La conception d'un plan de financement et l'identification de partenaires ont bien été mis en œuvre, avant d'être remplacés par de nouveaux objectifs	59
3.2 Les points d'améliorations du programme ASTRID	60
3.3 Au-delà des impacts directs, des externalités significatives tout au long du programme	62
3.3.1 Le programme a permis de stimuler la croissance économique et de générer de nombreux emplois	62
3.3.2 ASTRID a permis une considérable accélération de l'innovation, non seulement dans le nucléaire mais également dans différents secteurs connexes	66
3.3.3 ASTRID a permis de renforcer la compétitivité et la performance des acteurs économiques impliqués sur le programme	75
3.3.4 Une remobilisation en termes de capital humain pour la filière des RNR-Na, avec de nombreuses externalités générées en termes de savoir	78
3.3.5 Les technologies développées au cours d'ASTRID ont permis des avancées majeures en termes d'environnement et de santé, quoique s'inscrivant sur le long terme	85

3.3.6 Le programme ASTRID a permis une forte structuration non seulement de l'écosystème du CEA et du nucléaire français, mais aussi celui entre Etats sur le sujet du nucléaire 4G 87

1. Un projet inscrit dans le financement PIA, mais dont l'origine relève d'enjeux spécifiques en lien avec les ambitions françaises d'accès aux technologies de 4^{ème} Génération

Ce rapport porte sur l'évaluation de l'action ASTRID, financée dans le cadre du PIA entre 2010 et 2019. Son objectif était de permettre au CEA de conduire les études de conception (jusqu'au niveau d'un avant-projet détaillé) d'un **prototype industriel de réacteur à neutrons rapides (RNR) refroidi au sodium de 4^{ème} génération**. Ce programme comportait également des **études de faisabilité** et de **conception des installations du cycle associé**, ainsi que la remise à niveau de **grands équipements de R&D** et de **qualification technologique**.

Un RNR **diffère fortement des réacteurs nucléaires actuellement en exploitation commerciale** : en effet, ces derniers utilisent des *neutrons thermiques*, c'est-à-dire que les neutrons émis au moment de la fission sont délibérément ralentis (par de l'eau ou du graphite). Ils fonctionnent à partir de l'**uranium fissile (U235)** – qui ne représentent qu'une fraction très faible, uniquement **0,7 %** de l'uranium naturel. En revanche, dans un RNR, les neutrons ne sont pas ralentis et entretiennent la réaction en chaîne avec une **énergie cinétique supérieure** permettant :

- De **valoriser l'uranium (U238)** qui représente l'essentiel du minerai d'uranium (**99,3%**) ; les neutrons rapides peuvent soit le fissionner soit le transformer en plutonium (**Pu 239**) lui-même fissile – multipliant potentiellement par un ordre 100 l'énergie pouvant être produite à partir d'un kilo d'uranium ;
- **D'utiliser le plutonium** (fissionner les isotopes pairs et impairs), autrement dit de réemployer les matières nucléaires présentes dans les combustibles usés du parc nucléaire français actuel.

ASTRID visait à permettre à la France d'accéder aux **technologies nucléaires de 4^{ème} génération**, ces dernières couvrant des systèmes nucléaires répondant à **différents objectifs** :

- Poursuite des **progrès en compétitivité** et en **sûreté** atteints sur les réacteurs à eau de 3^{ème} génération ;
- Economie des **ressources en uranium** ;
- Minimisation de la **production de déchets radioactifs** ;
- Plus grande **résistance à la prolifération nucléaire**.

Dans ce contexte, ASTRID avait pour but essentiel de **qualifier des options innovantes** dans les domaines de la **sûreté** et de l'**opérabilité**, et de servir de test pour l'**utilisation des techniques d'inspection et de réparation avancées**. Le 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 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.

Ce rapport d'évaluation s'inscrit dans le cadre de la **convention signée entre l'Etat et le CEA** en septembre 2010, celle-ci prévoyant l'**obligation de réalisation de l'évaluation de l'action ASTRID**. Portant à la fois sur les aspects scientifiques, économiques, sociaux et environnementaux du programme, ce document vise 3 grands objectifs :

- Synthétiser dans une démarche pédagogique le **contexte**, le **déroulé** et les **principaux enjeux** du programme ;
- Analyser les **résultats et les impacts socioéconomiques** de l'action par rapport aux objectifs fixés dans la convention, ainsi que l'**efficacité de l'utilisation des crédits du PIA** (en tenant compte des **évolutions** en termes **d'orientations stratégiques** et de **critères d'évaluation**) ;
- Documenter les **externalités générées par ASTRID**, ainsi que ses **points d'amélioration** potentiels.

Il vise ainsi à rendre compte de l'ensemble des aspects générés par le programme **au-delà d'une vision normalisée purement macro-économique**, tout en **contextualisant les analyses produites** au regard de la complexité technique et du long historique dans lesquels s'inscrivait cette **action du PIA 1**.

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

1.1.1 ASTRID représente 3% du financement du PIA 1

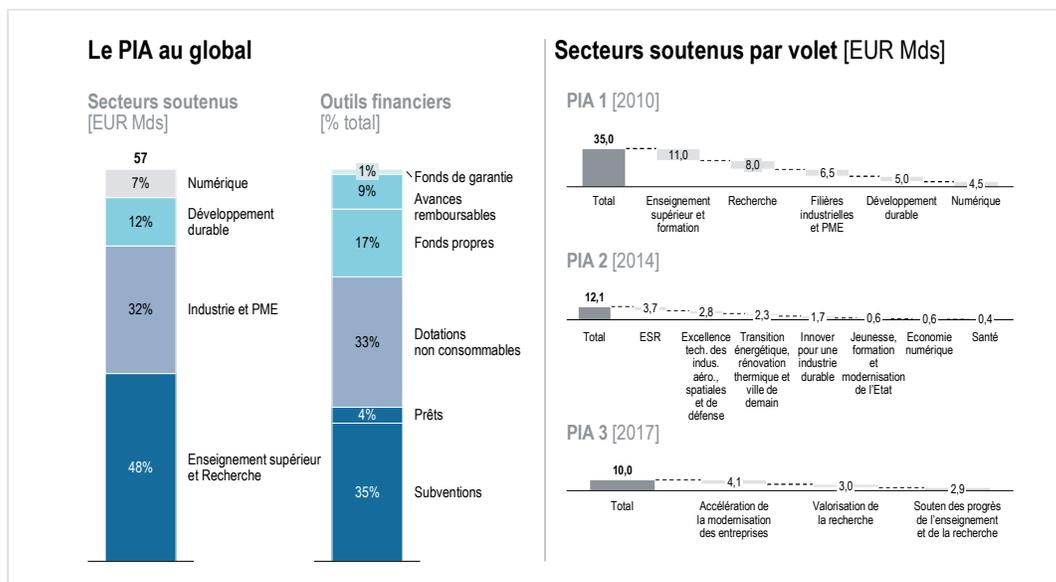
Le lancement du programme ASTRID s'inscrit dans le contexte du PIA, en tant que **projet majeur d'investissement** pour préparer l'**avenir du nucléaire en France**. Le PIA est un programme doté de **57 Mds EUR**, engagé depuis **2010** suite à la publication du **Rapport dit Juppé-Rocard** intitulé "*Investir pour l'avenir : priorités stratégiques d'investissement et emprunt national*". Il fut initié dans le cadre de la gestion des conséquences de la crise économique de la fin de 2008 (qui s'était notamment traduite par un net recul de l'investissement dans les dépenses publiques), et vise à stimuler la compétitivité, la croissance et l'emploi en France via deux principaux leviers :

- Le **financement de projets innovants**, prometteurs et transformants, avec un principe de **co-financement** par un ou plusieurs acteur(s) de chaque projet aux côtés de l'Etat ;
- **L'investissement massif** dans la **recherche et la formation**, afin de développer l'innovation et "*d'engager la transition vers un modèle de développement durable*" (cf. rapport Juppé-Rocard).

Cette politique d'investissement s'est inscrite avec deux grands objectifs, la faisant différer des politiques publiques d'investissement classiques. D'une part, un **objectif de continuité** sur des projets avec une portée à très long terme, dans la volonté d'éviter que les variations politiques impactent leurs durées d'action (de 10 ans en moyenne). D'autre part, un objectif **d'ouverture à de nouvelles expertises** par rapport aux modalités traditionnelles de la gestion de l'investissement public. Ce programme est piloté depuis 2018 par le **Secrétariat général pour l'investissement (SGPI)** – auparavant Commissariat général à l'investissement – sa mise en œuvre reposant sur une douzaine d'opérateurs (ADEME, ANR, ANDRA, ONERA, CNES...). Il s'est décomposé à date de notre rapport en 3 volets :

- **PIA 1** – lancé en 2010 et couvrant **45 actions**, avec un budget total de **35 Md EUR** ;
- **PIA 2** – lancé en 2014 et couvrant **31 actions**, avec un budget total de **12 Md EUR** ;
- **PIA 3** – lancé en 2017 et faisant parti du **Grand Plan d'Investissement**, pour un total de **10 Md EUR**.

Figure 1 : Présentation synthétique des financements effectués dans le cadre du PIA [montants des financements initiaux]



Ainsi, concernant le volet PIA 1, dans lequel était compris l'action ASTRID, la **LF 2010** a ouvert environ **35 Md EUR** pour financer les investissements d'avenir en faveur de quatre priorités nationales, à savoir :

- L'enseignement supérieur ;
- La formation et la recherche ;
- Les filières industrielles et les PME ;
- Le développement durable et l'économie numérique.

Figure 2 : Liste des différentes actions financées par le PIA 1 [Mission "Recherche et enseignement supérieur"]

	Opérateur	Montant [EUR m; évol. / 2010]
Mission « Recherche et enseignement supérieur » (PIA 1)		21 900 ▲
Programme « Pôles d'excellence »		15 621 ▲
Initiative d'excellence, Initiatives d'excellence en formations innovantes	ANR	7 364 ▲
Laboratoires d'excellence	ANR	1 866 ▲
Valorisation (SATT et CVT)	ANR	911 ▼
France Brevets	ANR	50 ▶
Instituts de recherche technologique	ANR	1 975 ▼
Instituts Carnot	ANR	600 ▲
Instituts hospitalo-universitaires (IHU)	ANR	850 ▶
Plan campus	ANR	1 300 ▶
Campus du plateau de Saclay	ANR	1 000 ▶
Programmes Projets thématiques d'excellence		2 863 ▼
Santé et biotechnologie	ANR	1 540 ▼
Équipements d'excellence	ANR	813 ▼
Espace	CNES	500 ▶
Programme « Instituts d'excellence en matière d'énergies décarbonées »		889 ▼
Instituts d'excellence	ANR	889 ▼
Programme « Recherche dans le domaine de l'aéronautique »		1 685 ▲
Démonstrateurs technologiques et aéronefs du futur	ONERA	1 685 ▲
Programme « Nucléaire de demain »		1 000 ▶
Réacteur de 4 ^e génération ASTRID	CEA	627 ▼
Réacteur Jules Horowitz	CEA	248 ▶
Recherche en matière de traitement et de stockage des déchets	ANDRA	75 ▼
Recherche en matière de sûreté nucléaire	CEA	50 ▲

1.1.2 ASTRID relève d'une logique propre à l'histoire de la filière nucléaire française...

Si le programme ASTRID relève d'une logique d'innovation à très long terme, il trouve son origine dans les enjeux spécifiques de la filière nucléaire française, portés par des volontés présidentielles. Ainsi, lors des vœux aux « forces vives de la nation », le **Président Jacques Chirac** annonça le **5 janvier 2006** le lancement de la conception au sein du CEA d'un **prototype de réacteur de 4^{ème} génération**, avec deux grands principes d'intention :

- L'association avec des **partenaires industriels** français et internationaux ;
- Une volonté de **déploiement commercial** d'un réacteur de 4^{ème} génération d'ici le **milieu** de siècle.

Cet objectif fut renforcé par la **loi du 28 juin 2006** relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs, qui mentionnait que la France devait être en capacité de mettre en exploitation un **prototype d'installation** pouvant traiter les **déchets radioactifs à vie longue**. Dans ce contexte, tout un ensemble de **travaux préparatoires** ont été menés au cours des quatre années précédant la mise en place du PIA, permettant aux acteurs majeurs de la filière nucléaire française (EDF, CEA, Areva) de :

- Se **structurer progressivement** autour du futur programme ;
- Mobiliser dès le début d'ASTRID en 2010 une **feuille de route claire** concernant les **différentes options technologiques**.

ASTRID est **extrêmement atypique** par rapport aux autres actions du PIA, en particulier parce que :

- **L'opérateur** en charge du suivi du programme était également le **bénéficiaire des financements** – ce qui limitait fortement la valeur ajoutée du cadre du PIA par rapport aux autres actions financées ;
- Contrairement aux autres actions, il n'existait pas de choix au sein d'un **éventail de projets potentiels à financer** ensuite, mais un **unique projet de long terme** à mener et qui de plus était **défini à l'avance**.

C'est donc avant tout la **volonté présidentielle de l'époque** de soutenir la position de la France sur les enjeux du nucléaire 4^{ème} génération qui explique l'inclusion d'ASTRID au sein du PIA. Un **effet d'aubaine** potentiel doit être souligné : ainsi, le PIA a pu servir implicitement de moyen pour accorder une **subvention exceptionnelle au CEA**, destinée à un **projet non récurrent** nécessitant des montants de financement atypiques. De plus, comme les différents initiateurs d'ASTRID avaient commencé à se **structurer plusieurs années avant le lancement du PIA** en 2010, la direction du CEA a su **venir efficacement mobiliser cette nouvelle source de crédit**.

Au titre de la LFR 2010, **900 m EUR** furent attribués au CEA afin de lui **donner les moyens financiers** et la **visibilité nécessaires** sur plusieurs années pour mener les efforts de recherche relatifs à la **préparation des technologies nucléaires de demain (futur réacteur nucléaire de 4^{ème} génération et réacteur Jules-Horowitz ; outils stratégiques de recherche** afin d'améliorer encore les performances et la sûreté de la filière nucléaire). Les projets ainsi financés visaient à donner à la France la possibilité de "conserver sa position de premier plan dans le domaine de l'énergie nucléaire" conformément aux objectifs prévus dans la **loi du 13 juillet 2005** de programme fixant les orientations de la politique énergétique.

Le CEA a été chargé de la gestion de ces crédits : ces 900 m EUR se sont répartis en **651,6 m EUR** pour le prototype industriel de démonstrateur du réacteur de 4^{ème} génération (**programme ASTRID**) et en **248,4 m EUR** pour le projet de **réacteur Jules-Horowitz**. Le rôle de coordinateur de ce programme par le CEA s'inscrit dans le **prolongement historique des précédents RNR** développés depuis les années 1960, dans lesquels cet organisme a toujours été partie prenante (en partenariat avec EDF), à savoir :

- **Rapsodie** (réacteur exploité par le CEA entre **1967 et 1983**) ;
- **Phénix** (réacteur exploité par le CEA et EDF entre **1974 et 2009**) ;
- **SuperPhénix** (exploité entre **1984 et 1998** par EDF / NERSA avec le support du CEA opérateur de R&D).

C'est d'ailleurs cette problématique de continuité des compétences dans les RNR qui poussa les décideurs à **prolonger l'exploitation de Phénix jusqu'en 2009**, afin de préparer au mieux le lancement d'ASTRID en 2010 via notamment la formation sur ce réacteur d'une partie des futurs personnels du programme. Les RNR sont donc historiquement un **objet très spécifique** dans le panorama nucléaire français, **bien distincts** de la logique d'exploitation commerciale d'un parc standardisé de **réacteurs à eau pressurisée**.

Le financement de l'action ASTRID visait à permettre au CEA de **conduire les études de conception** d'un **prototype industriel de RNR refroidi au sodium de 4^{ème} génération** jusqu'au niveau d'un avant-projet détaillé, mais aussi les études de **faisabilité** ou de **conception** des installations du cycle associé, et la **remise à niveau de grands équipements de R&D et de qualification technologique**. Le but du programme était d'aboutir sur le long terme au déploiement de RNR pour des **applications de production électrique** et de gestion des matières nucléaires en complément d'un parc électronucléaire composé majoritairement de REP.

Il est à noter qu'il était acté dès le départ que le PIA servirait à financer des **études** et de **l'ingénierie**, mais que ce soutien serait **insuffisant pour construire un réacteur** et que la prolongation du programme au-delà de cette phase d'étude représenterait une **très grande marche financière**. La volonté des principaux acteurs était en particulier d'aboutir grâce au PIA à **trois résultats** :

- La preuve de la **pertinence** de la solution technique ;
- Une estimation fiable des **coûts de construction** ;
- La préparation du montage industriel pour les **phases ultérieures de construction et d'exploitation**.

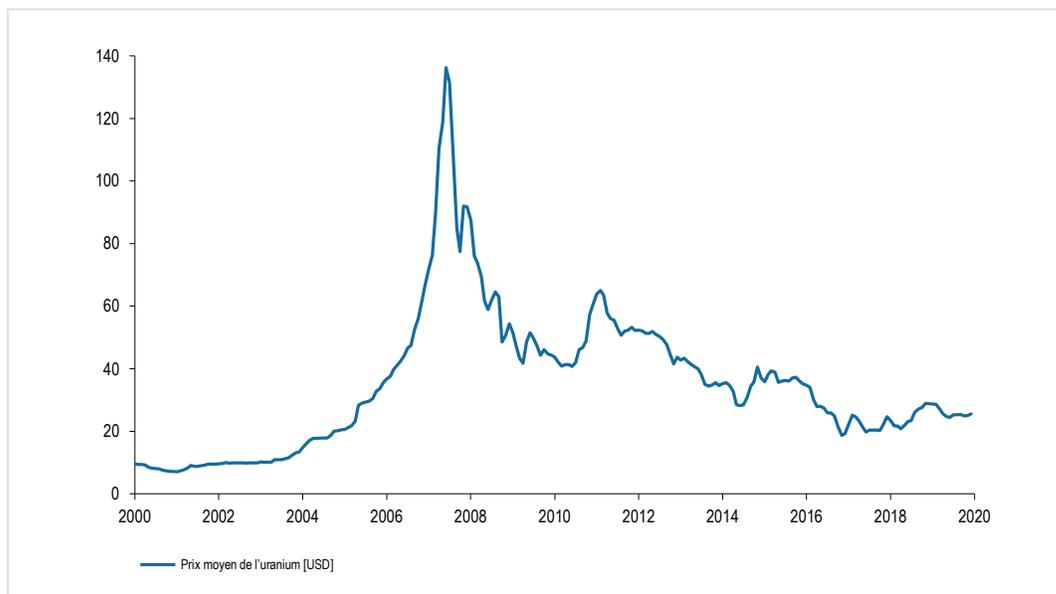
1.1.3 ... Et répond à un enjeu, critique au début des années 2010, de fermeture de cycle du combustible

Le développement de cette nouvelle génération de RNR était concomitant au **niveau international** avec le lancement de **grands programmes nucléaires** dans différents pays (**Chine, Inde, Russie, etc.**), générant une forte **hausse des prix de l'uranium**.

Ainsi, le lancement de cette nouvelle génération de RNR fut fortement marqué par ce **contexte géopolitique**, dans la mesure où il existait un consensus entre l'Etat, Areva, EDF et le CEA sur des **risques de tensions sur le marché de l'uranium d'ici le milieu du XXIème siècle**.

Alors que les réacteurs actuellement en exploitation en France fonctionnent à partir d'un uranium que notre pays doit importer, les RNR seraient **capables d'employer les matières déjà présentes sur le sol français** : l'uranium appauvri (U238) sous-produit des étapes d'enrichissement de l'uranium (318.000 tonnes à disposition fin 2018 d'après l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs) et le plutonium en particulier celui présent dans les combustibles MOX usés. ASTRID visait donc à valider une technologie de réacteur capable de **garantir** sur le long terme **l'indépendance énergétique nationale**. Cette problématique s'inscrivait dans une **vision intégrée et fermée de cycle du combustible**, avec la valorisation des matières produites par l'industrie électronucléaire française.

Figure 3 : Evolution historique du cours de l'uranium
[valeur en USD par "pound" (~0,45 kilo), indice mensuel moyen du FMI, 01/2000-12/2019]



1.1.4 Un programme avec des orientations stratégiques tiraillées entre deux objectifs, mais qui a su rapidement prioriser des axes de R&D

La vision de l'historique du programme permet donc de comprendre que les **orientations stratégiques** d'ASTRID ont été tiraillées entre **deux objectifs** :

- **La valorisation des matières uranium et plutonium**, dans un contexte de recherche d'indépendance énergétique et en lien avec l'objectif de maintenir un nucléaire compétitif par rapport à des tensions sur le marché des matières premières ;
- La prise en compte par la filière nucléaire **des orientations de la loi Bataille sur la faisabilité de la transmutation** des déchets nucléaires de haute activité issus du nucléaire classique.

Si ces deux orientations ne divergeaient pas, elles étaient **néanmoins potentiellement porteuses de conflits** en cas de **redéfinition majeure du programme**, et nécessitaient d'être clarifiées dans **l'optique de l'élaboration des prochaines étapes clés post-PIA** de la filière RNR-Na française. En effet, dans l'optique de la création d'un consortium pour la construction, il était important de **pondérer ces deux objectifs**, afin notamment de :

- **Jauger de la priorisation en termes d'objectifs stratégiques** (ex : consolidation des coûts et des performances des RNR contre optimisation du degré de traitement des combustibles usés) ;
- Evaluer la **pertinence des actions développées** en fonction des priorités des acteurs de référence (EDF en particulier).

Malgré ces hésitations, le **programme** a su rapidement s'orienter vers l'objectif du recyclage des éléments U et Pu (indépendance énergétique) et 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**, particulièrement axée sur la prévention des accidents graves pouvant conduire à la fusion généralisée du cœur (cf. accident de Fukushima) ;
- Une **résistance accrue aux accidents graves et aux agressions externes**, notamment de par la conception de systèmes d'évacuation de la puissance résiduelle redondants et diversifiés, ainsi que via les aspects liés au risque de re criticité et à la rétention d'un cœur fondu ;
- La recherche d'un **système de conversion d'énergie optimisé et sûr** visant à diminuer, voire à faire disparaître totalement, le risque d'interaction entre le sodium et l'eau ;
- La revue d'**options de conception du réacteur pour faciliter l'inspection et la maintenance**, et de façon plus générale, pour augmenter la **disponibilité**, les **performances** et **l'économie globale** de l'installation (cf. taux de disponibilité du réacteur, qui était sur les générations précédentes de RNR en dessous de 50% contre un objectif de 90% pour des réacteurs commerciaux).

1.1.5 Le retournement progressif du contexte économique causa la non-extension du programme à sa phase suivante

En dépit du rapide degré d'avancement de design du prototype et du rôle pionnier de la France sur la technologie des RNR-Na, **plusieurs facteurs conjoncturels** intervenus **progressivement** pendant le programme ont finalement abouti à la non-extension d'ASTRID à sa phase suivante, à la suite de la clôture de l'action PIA 1.

Tout d'abord, par rapport au **contexte de démarrage** du programme ASTRID en 2010, on constate un vrai **questionnement** par les **pouvoirs publics** de l'avenir du nucléaire, ainsi qu'une **dériorisation du développement de ce type d'énergie** :

- En premier lieu, l'accident du réacteur de Fukushima en 2011 a provoqué une **dégradation de la perception du nucléaire par l'opinion publique française**, ce qui a rendu l'accord de financement au développement de nouvelles technologies nucléaires plus **complexe politiquement**. Ce même phénomène s'observe d'ailleurs dans l'ensemble du **monde occidental**, avec un choix assumé de la part de la quasi-totalité des gouvernements de **prolonger la vie des installations nucléaires existantes** au lieu de construire de nouvelles centrales ;
- Un questionnement s'est également posé sur la **compétitivité du nucléaire par rapport à d'autres sources d'énergie**, en lien avec **l'explosion des coûts de construction de nouvelles centrales**, mais aussi avec les **besoins croissants de provisionnements de coûts** pour assurer le démantèlement des anciens réacteurs.

D'autre part, en lien spécifique avec le programme :

- Le **contexte post-Fukushima** a engendré une **forte baisse des prix de l'uranium** à l'international (passage de ~300 USD / kilo en 2007 à ~55 USD / kilo en 2018), rendant **moins stratégique** une autosuffisance française sur cette matière première. Au sein de la filière nucléaire, les orientations stratégiques à proposer à l'Etat ont été instruites par le CEA, EDF, ORANO et FRAMATOME au sein d'un groupe de travail rendant compte de ses activités devant la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) ;

- Enfin, les **nombreux retards de l'EPR de Flamanville**, le **chantier industriel du "grand carénage"** et les très **grandes difficultés financières de FRAMATOME** ont provoqué une baisse d'appétence des acteurs de la filière et en particulier d'EDF pour le développement de ce nouveau projet de réacteur.

La vision stratégique française sur la fermeture du cycle du combustible a finalement été formalisée dans le projet de Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) qui exprime le consensus qui s'est dégagé entre l'Etat et la filière nucléaire sur l'affirmation de la fermeture du cycle du combustible comme objectif à long terme et sur le constat d'un décalage significatif dans le temps de la nécessité de déployer des RNR à l'échelle industrielle. C'est ce qui conduit à différer la réalisation d'un démonstrateur tel qu'ASTRID et par conséquent à ne pas enclencher la suite naturelle de l'action ASTRID du PIA.

1.2 Avec ASTRID, la France se maintient dans le club très fermé des pays maîtrisant les technologies nucléaires de 4^{ème} génération

1.2.1 Au sein des réacteurs de 4^{ème} génération, les RNR-Na sont l'option technologique la plus mature

Le programme ASTRID s'inscrit dans la logique du **développement d'une 4^{ème} génération ("4G")** de centrales nucléaires. 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**. La notion de réacteur nucléaire 4G est **complexe** et **varie** en fonction des pays, sans qu'il n'existe de définition précise – toutefois, les différents participants au GIF s'accordent sur le fait que ces systèmes de 4^{ème} génération doivent répondre aux **critères suivants** :

- **Durabilité** du nucléaire ;
- Progrès en **compétitivité** et en **sûreté** ;
- Economie des **ressources en uranium** ;
- Minimisation de la **production de déchets radioactifs** ;
- Plus grande **résistance** à la **prolifération nucléaire** ;
- Application de l'énergie nucléaire à **d'autres usages que la production d'électricité**.

Figure 4 : Liste des pays participants au Forum International Génération IV

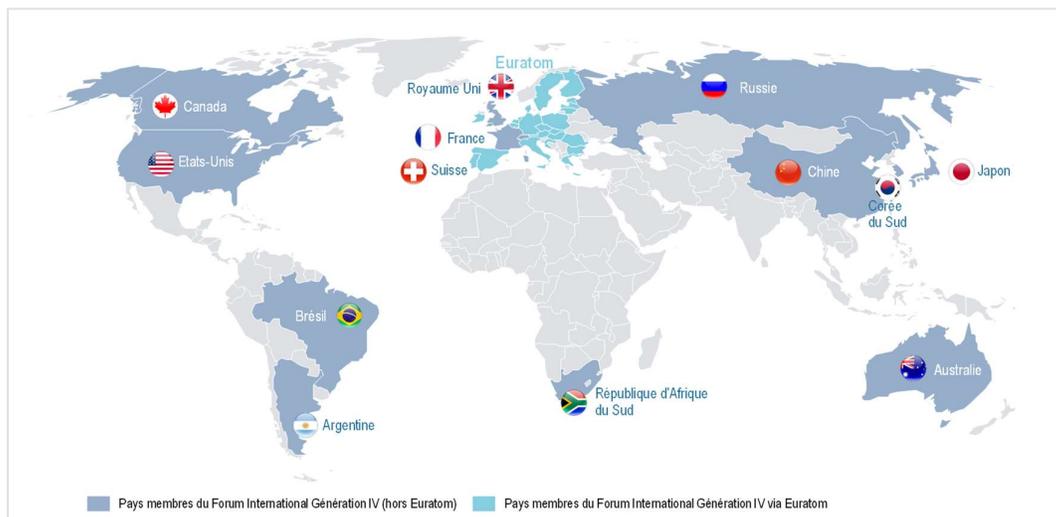
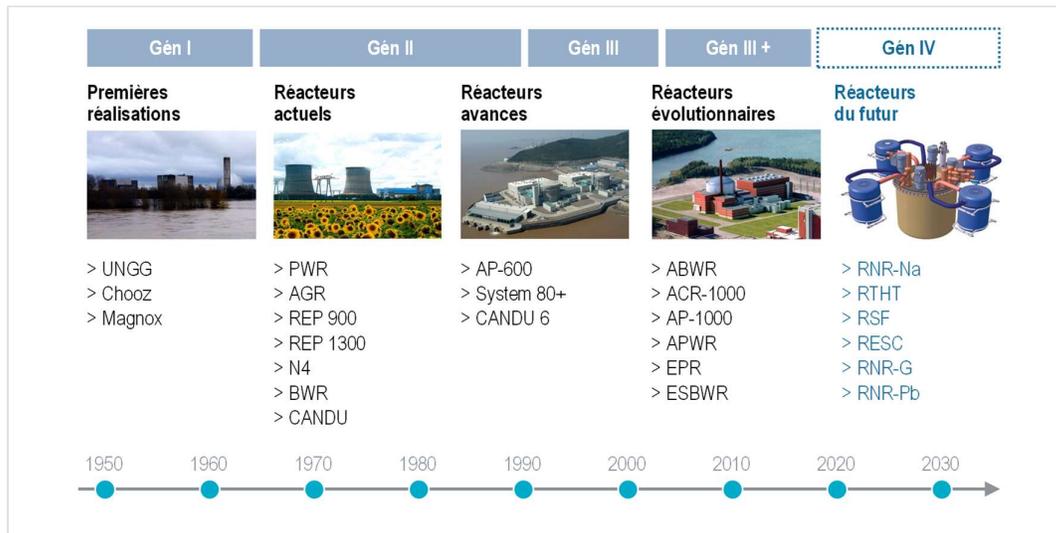


Figure 5 : Illustration synthétique des différentes générations de réacteurs nucléaires

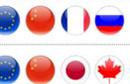


Depuis 2011, le GIF a sélectionné six filières prioritaires dont les réacteurs pourraient entrer en service à l'horizon 2030 :

- Le **réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium** – dit **RNR-Na** (FR) ou **SFR** (EN), famille à laquelle appartient ASTRID :
 - Fonctionne en neutrons rapides avec une capacité de surgénération permettant **d'utiliser l'uranium appauvri et le plutonium comme combustibles** ;
 - Utilisation du **sodium** comme **fluide caloporteur** des circuits primaire et secondaire ;
 - Deux **configurations** principales pour ce type de réacteur :
 - « **Intégré** » (Phénix, SuperPhénix, PFR, CEFR) pour lequel le **circuit primaire est totalement contenu dans une cuve** dans laquelle les pompes primaires et des échangeurs de chaleur sont immergés ;
 - « **A boucles** » (Joyo, Monju) pour lequel le **sodium primaire circule dans des boucles** reliant une cuve principale à d'autres cuves où sont implantés les gros composants.
- Le **réacteur à très haute température** – dit **RTHT** (FR) ou **VHTR** (EN) :
 - Fonctionne à l'**uranium enrichi** et avec des **neutrons thermiques** (cœur modéré au graphite) ;
 - Cœur refroidi par une **circulation d'hélium sous pression** évacuant une chaleur qui dépasse les **1000°C** ;
 - Production électrique via une **turbine à gaz** pour un rendement proche de **50%**, ou bien où un **échangeur récupère des calories à très haute température** (tHT) alimentant un procédé thermochimique ;
 - Valorisation du potentiel énergétique des matières nucléaires équivalente à celle des réacteurs actuels (pas de gain).
- Le **réacteur à neutrons rapides à sels fondus** – dit **RSF** (FR) ou **MSR** (EN) :
 - Concept **très différent** des autres réacteurs, avec un **liquide comme combustible** (mélange de sels fondus et notamment de sels d'uranium ou de thorium) ;
 - Recherches qui s'orientent vers un **concept fonctionnant en spectre de neutrons rapides**, afin d'utiliser au mieux l'uranium et le plutonium mais aussi potentiellement pour permettre la transmutation des actinides mineurs ;
 - Type de réacteur qui semble répondre au mieux aux **différents impératifs de sûreté**, mais encore à un concept à l'**état d'études exploratoires (faisabilité non acquise)** ;

- Le réacteur à eau supercritique – dit **RESC** (FR) ou **SCWR** (EN) :
 - **Concepts dérivés** de réacteurs déjà construits : réacteur à eau bouillante (**REB**) ou réacteur à eau lourde (**CANDU**) ;
 - **Eau supercritique** (à la fois gazeuse et liquide) permet d'obtenir une **efficacité thermique de 45%** contre **33% pour les réacteurs** en exploitation.
- Le réacteur à neutrons rapides refroidi au gaz – dit **RNR-G** (FR) ou **GFR** (EN) :
 - Utilisation de neutrons rapides permettant **d'utiliser l'uranium appauvri et le plutonium comme combustibles** ; combustible sous la forme de **pastilles de carbure d'uranium et de plutonium** ;
 - **Refroidis par de l'hélium à haute pression** et avec une température jusqu'à **850 °C** ;
 - Concept encore à un **état d'études exploratoires (faisabilité non acquise)** ;
- Le réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb dit **RNR-Pb** (FR) ou **LFR** (EN) :
 - Utilisation de neutrons rapides avec une capacité de surgénération permettant **d'utiliser l'uranium appauvri et le plutonium comme combustibles** ;
 - Cœur refroidi par le **métal fondu plomb** ou un **alliage plomb-bismuth** souvent dénommé LBE (« Lead Bismuth Eutectic ») ;
 - Contrairement au sodium, **absence de réaction violente de nature chimique** en cas de contact avec l'eau ou l'air.

Figure 6 : Synthèse des principales technologies nucléaires de 4ème génération

Type de réacteur	Principaux pays avec équipes de R&D	Spectre de neutrons	Liquide de refroidissement	Température de sortie, °C	Cycle de combustible	Capacité (MW)
RTHT		Thermal	Hélium	900 – 1000	Ouvert	250 – 300
RNR-G		Rapide	Hélium	850	Fermé	1200
RNR-Na		Rapide	Sodium	500 – 550	Fermé	50 – 150 300 – 1500 600 – 1500
LFR		Rapide	Plomb	480 – 570	Fermé	20 – 180 300 – 1200 600 – 1000
RSF		Thermal et rapide	Sels de fluor	700 – 800	Fermé	1000
SCWR		Thermal et rapide	Eau	510 - 625	Ouvert et fermé	300 – 700 1000 - 1500

ASTRID fait partie de la **famille des RNR-Na**, option de loin la **plus mature** parmi les **diverses options technologiques de RNR** (VHTR exclus). Le GIF confirmait par exemple en avril 2014 qu'« à ce jour, parmi les différents systèmes nucléaires envisagés par le Génération IV International Forum, **seul le système RNR-Na présente une maturité suffisante** pour que la réalisation d'un prototype industriel de réacteur de quatrième génération soit envisageable dans la première moitié du XXIème siècle ». Ainsi, il n'existe **aucun équivalent en termes d'avancées de développement sur les autres filières prioritaires**, qui sont encore toute au stade de la preuve de concept (REX à acquérir sur un réacteur expérimental de petite puissance), alors qu'il existe déjà **plus de 400 années de fonctionnement de réacteur cumulées** sur les RNR-Na.

1.2.2 Le programme ASTRID a conforté la place de la France comme pionnier des RNR-Na

Les RNR-Na bénéficient d'une **longue expérience en termes d'exploitation de réacteurs**, avec une expérience cumulée de près de **400 années de fonctionnement** :

- En France, les réacteurs :

- Rhapsodie (40 MWe – arrêté en 1983) ;
- Phénix (250 MWe - arrêté en 2009) ;
- SuperPhénix (1240 MWe - arrêté en 1997).
- En **Grande-Bretagne**, les réacteurs :
 - **DFR** (*Downreay Fast Reactor*) de 14 MWe, qui a fonctionné de 1959 à 1977 ;
 - **PFR** (*Prototype Fast Reactor*) de 250 MWe, qui a fonctionné de 1974 à 1994 ;
- Dans les pays de l'ancienne **Union soviétique** :
 - Le réacteurs **BN-350** (250 MWe), situé au **Kazakhstan** et arrêté en 1998 ;
 - Le réacteur expérimental **russe BOR-60**, mis en service en 1968, toujours en fonctionnement ;
 - Les réacteurs **russe Beloyarsk 3** (BN-600) et **Beloyarsk 4** (BN-800), 600 et 880 MWe, en fonctionnement depuis respectivement 1980 et 2015 ;
- Au **Japon** :
 - Le réacteur expérimental **Joyo**, dont la puissance a atteint 140 MWth (mis en service en 1977 et à l'arrêt depuis 2007, travaux pour un redémarrage vers 2023) ;
 - Le réacteur **Monju**, de 280 MWe, démarré en 1994 et mis à l'arrêt définitif depuis 2013 suite à l'accident de Fukushima (construit à proximité d'une faille sismique considérée comme encore active) ;
- En **Chine**, le **CEFR** (China Experimental Fast Reactor), 20 MWe, exploité par l'Institut chinois de l'énergie atomique, fonctionne depuis 2010 ;
- Aux **Etats-Unis**, on note plusieurs réacteurs expérimentaux :
 - Les réacteurs **EBR-I** et **EBR-II**, construits sur le site de l'Idaho National Laboratory (exploités de 1951 à 1962 et de 1961 à 1991) ;
 - Le réacteur **Fermi 1**, basé dans l'Etat du Michigan (exploité de 1963 à 1972) ;
 - Le réacteur **SEFOR** (Southwest Experimental Fast Oxide Reactor), situé dans l'Arkansas (exploité de 1969 à 1972)
 - Le réacteur **FFTF** (Fast Flux Test Facility (FFTF), prototype construit par le Département de l'Energie des Etats-Unis (exploité entre 1982 et 1992) ;
- En **Inde**, le réacteur expérimental **FBTR** (Fast Breeder Test Reactor), qui fonctionne depuis 1985 (13 MWe).

En outre, des projets sont à l'étude ou déjà en phase de construction dans quelques pays :

- En **Russie**, le **projet BN-1200** dont l'étude de conception a démarré en 2012 (avec plusieurs phases d'interruption depuis), et vise une puissance de 1.220 MWe ;
- En **Chine**, le projet de construction **d'un prototype** a été lancé en 2017 par le CNNC (*China National Nuclear Corporation*) : le projet **CEFR 600** (dans la province de Fujian), qui vise la construction d'un démonstrateur selon un cahier des charges et une puissance (600 MWe) similaires à ceux d'ASTRID ;
- Aux **Etats-Unis**, le projet de réacteur expérimental **VTR** (*Versatile Test Reactor*) a été initié en 2019 par le *Department of Energy*. Son cahier des charges le positionne comme un outil d'irradiation et pas comme un démonstrateur technologique (pas de production électrique) ;
- En Inde, le **PFBR** (*Prototype Fast Breeder Reactor*), d'une puissance de 500 MWe et dont la construction a démarré en 2007. Le démarrage est prévu en 2020. L'objectif à terme est d'aboutir à la construction de 5 réacteurs de type RNR-Na disposant d'une puissance similaire à celle d'ASTRID. Le mode opératoire de ce pays est de passer par une très forte **internalisation, effectuée par l'IGCAR** (Indira Gandhi Centre for Atomic Research) – sans aucun partenariat avec d'autres pays en raison du statut spécifique de l'Inde (cf. refus de la ratification du traité de non-prolifération nucléaire, qui interdit toute collaboration en dehors d'enjeux de sûreté nucléaire).

La France étant historiquement perçue comme un **pionnier mondial sur les RNR-Na**, la non-extension du projet ASTRID aux phases de réalisation a suscité de **nombreuses interrogations** de ces différents pays concernant l'avenir de cette technologie. Cette décision a également généré un **déclin de l'image française** sur la problématique du **développement des réacteurs nucléaires de 4^{ème} génération**, qui avait jusque-là pu permettre d'aboutir à des accords de collaboration avec le **Japon** et les **Etats-Unis**. Toutefois de nombreuses actions de communication du programme R4G sur la mise en

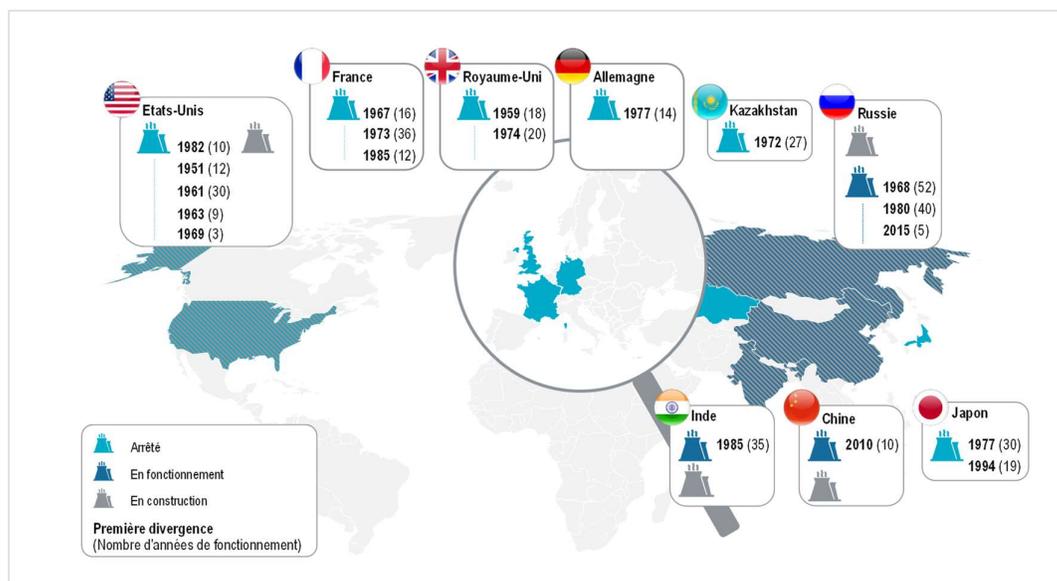
place d'un programme de développement des RNR et la réalité du contenu du programme de R&D prenant le relais du projet ASTRID ont permis de contrebalancer en partie cet effet négatif.

En **Europe**, il n'existe **plus d'acteur majeur** actif sur ce sujet en dehors de la France, même si différents pays s'intéressent à nouveau à ce sujet et commencent à déployer des **efforts de R&D spécifiques**. Ainsi, **le Royaume-Uni** vient récemment de rejoindre le GIF, et le CEA a renoué au cours des années 2010 des discussions avec son équivalent le *National Nuclear Laboratory* – témoin du **regain d'intérêt du Royaume-Uni** sur le nucléaire de 4^{ème} génération.

Enfin, quelques pays ont fait le choix **d'arrêter leur programme au stade de la construction de prototypes** (dans un contexte plus général d'arrêt du nucléaire) :

- **L'Italie** avec l'abandon en cours de construction (1990) du projet **PEC** (*Prova elementi di combustibile*) à Brasimone, qui avait été démarré en 1983 ;
- **L'Allemagne**, avec la décision de stopper le générateur de **Kalkar** (SNR-300) pour des raisons politiques en 1991 (d'une puissance ciblée de 327 MWe), dont la centrale en cours de finalisation n'avait pas encore reçu son combustible nucléaire.

Figure 7 : Panorama des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium dans le monde



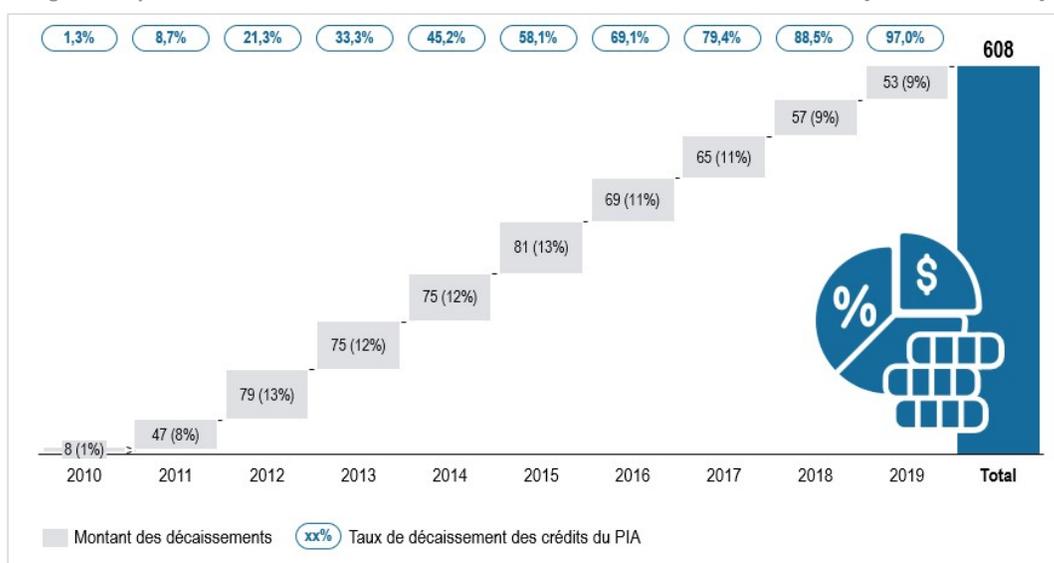
1.3 Des financements consommés, qui ont pu être diversifiés via notamment un effet de levier significatif

1.3.1 L'action ASTRID a consommé 97% de son enveloppe, contre 48% en moyenne pour les différentes actions du PIA 1 (à fin 2018)

Dans le cadre des financements liés au PIA, 651,6 m EUR ont été initialement destinés à l'action ASTRID. Ces financements furent ensuite révisés à la baisse à 626,6 m EUR en 2012, par suite du redéploiement de 25 m EUR vers l'action « recherche dans le domaine de la sûreté nucléaire et de la radioprotection ». Ce changement, effectué après l'accident de Fukushima, fut acté par la convention du 31 janvier 2012 entre l'Etat, l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, le CEA et l'Agence nationale de la recherche relative au programme d'investissements d'avenir.

Au total, près de **608 m EUR (TTC)** des crédits mobilisés par l'Etat ont été **utilisés** dans le cadre d'ASTRID, 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 pu bien plus efficacement employer les fonds mis à sa disposition grâce au **double rôle de coordinateur et de bénéficiaire des financements** joué par le **CEA** (contrairement aux autres actions où ces deux fonctions étaient distinctes), notamment parce qu'il n'a pas eu à effectuer de **travail d'identification des différents projets à financer**.

Figure 8 : Synthèse de l'utilisation des financements du PIA dans le cadre de l'action ASTRID [m EUR, 2010-2019]



1.3.2 Des sources de financement diversifiées

Le programme ASTRID a été financé à hauteur de près de **1,2 Mds EUR** au cours des 10 années de son existence, via 4 sources principales :

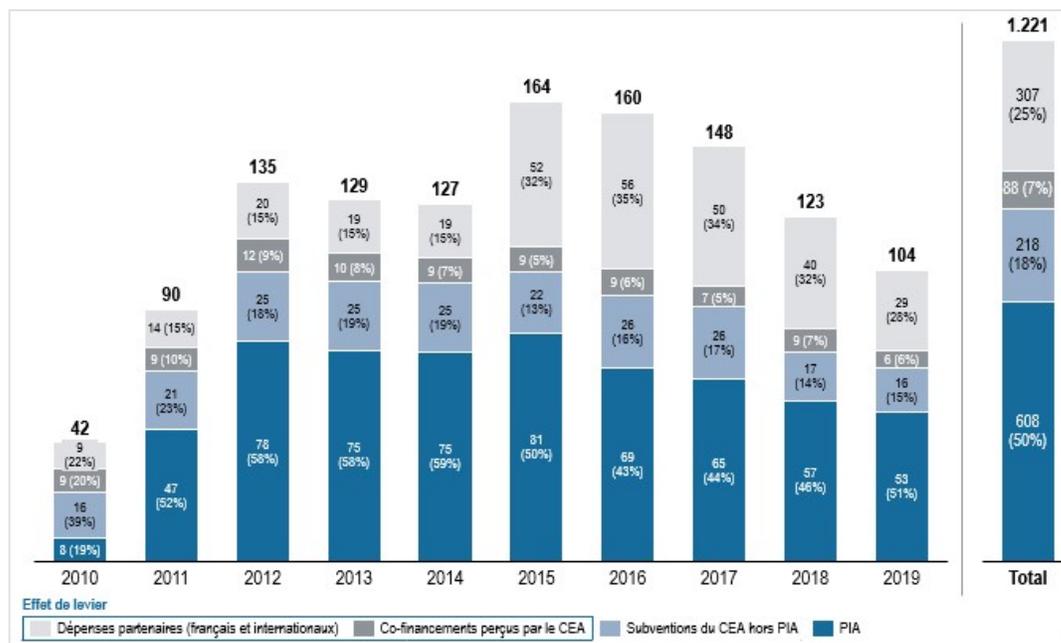
- Les **subventions accordées au CEA de manière régulière par l'Etat** (principalement employées pour les salaires des employés du CEA mobilisés sur le programme) ;
- La **ligne dédiée du PIA**, servant en particulier à couvrir les différents investissements, dépenses des partenaires et coûts non usuels du CEA liés à ASTRID ;
- Les **co-financements perçus par le CEA** au cours du programme. Il s'agit soit **d'apports financiers directs** de certains partenaires, soit de subventions via des **projets de recherche européens** et l'ANR ;
- **L'apport financier des 14 partenaires industriels et de la dizaine de partenaires de R&D**, qui ont contribué au financement du projet (en prenant en charge une partie des dépenses effectuées dans le cadre du programme).

Près de **1.221 m EUR** ont été dépensés au cours du programme ASTRID, avec **608 m EUR (TTC)** de financements du PIA (soit **50%** du total), **218 m EUR** de subventions apportées par le CEA via son financement par l'Etat hors PIA (soit **18%** du

total), **88 m EUR** de co-financements (soit **7%** du total) et **307 m EUR** d'apports par les partenaires français et internationaux du CEA (soit **25%** du total). La part relative de ces différents crédits a fortement varié :

- Les **subventions du PIA** représentent ainsi jusqu'à **59%** du total en **2014**, contre **19%** des financements en **2010** (année de lancement du programme);
- Les **apports des partenaires français et internationaux** varient quant à eux entre **35%** du total en **2016** contre **15%** en **2011/2012/2013**, traduisant ainsi la forte montée de l'implication de ces acteurs pendant le programme ;
- Les **subventions apportées par le CEA via son financement par l'Etat** (hors PIA) sont restées stables (autour de **15-20%**) tout au long de la vie du programme, excepté l'année de lancement d'ASTRID où elles ont représenté **39%** du total ;
- Enfin, les **co-financements perçus par le CEA** varient entre **20%** du total en **2010** et **5%** en **2015** ainsi qu'en **2017**.

Figure 9 : Analyse par source de financement des crédits alloués au programme ASTRID [m EUR, 2010-2019]



En termes d'**effet de levier** (qui se caractérise comme la capacité d'un euro d'argent public à générer des financements du secteur privé), on constate que :

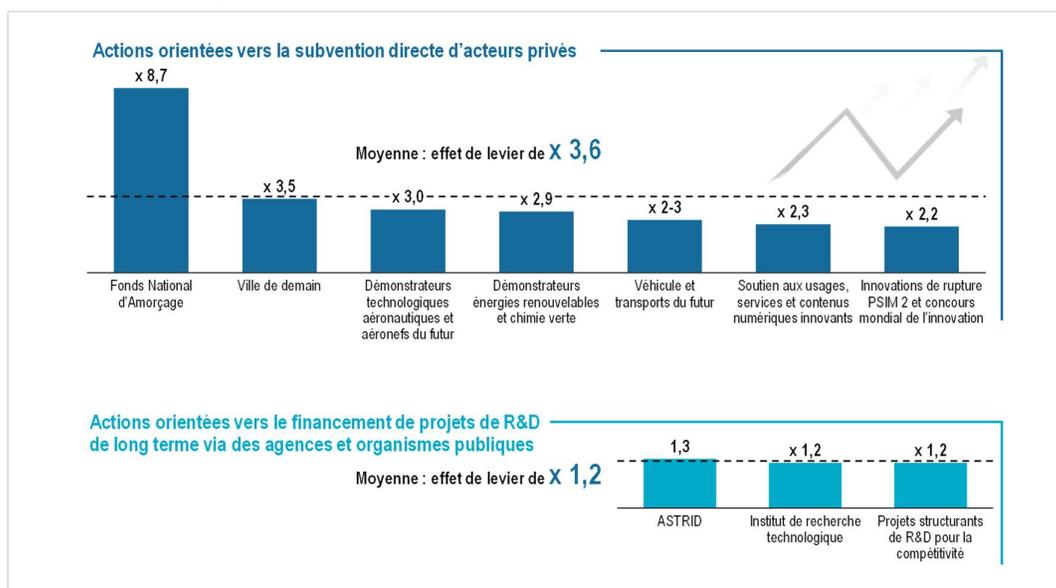
- La moyenne des actions du PIA 1 pour lesquelles cet **indicateur** est pertinent est de l'ordre de **x 2,88** ;
- L'effet de levier du programme ASTRID se situe quant à lui autour de **x 1,2** (en prenant en compte comme montants issus du privé les **dépenses des partenaires français et internationaux du CEA**, ainsi que les **co-financements perçus par le CEA**).

Toutefois, cet écart par rapport à la moyenne reflète l'**existence de deux grands types de projets** au sein de ce PIA 1, qui traduisent des **situations très différenciées** :

- Les actions orientées vers la **subvention directe d'acteurs privés**, à savoir : Fonds National d'Amorçage, Ville de Demain, Démonstrateurs technologiques aéronautiques et aéronefs du futur, Démonstrateurs énergies renouvelables et chimie verte, Véhicule et transports du futur, Soutien aux usages, services et contenus numériques innovants et Innovations de rupture PSIM 2 et concours mondial de l'innovation. Elles se caractérisent par un **effet de levier élevé** (d'environ **x 3,6**), qui leur est **structurel** dans la mesure où le **co-financement par des acteurs privés** était une **condition requise au déblocage de fonds du PIA**.

- Les actions orientées vers le **financement de projets de R&D de long terme via des agences et organismes publics**, à savoir : ASTRID, Institut de recherche technologique, Projets structurants de R&D pour la compétitivité. Elles ont en moyenne un **effet de levier beaucoup plus faible** (de l'ordre de **x 1,2**), lié au fait que, dans ces actions, les apports du privé sont pensés comme **venant en complément de projets publics** visant des **développements technologiques de long terme**.

Figure 10 : Comparaison des effets de levier des différentes actions du PIA 1



1.4 Des indicateurs de performance clairs et objectifs ont été définis dans la convention du programme

Objectifs initiaux du programme ASTRID

Quatre indicateurs de performance ont été définis par la convention entre l'Etat et le CEA relative à l'action "Réacteur de 4^{ème} génération ASTRID" :

- 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 à des fins industrielles ou commerciales ;
- La création d'un plan de financement pour la phase de réalisation d'ASTRID et l'identification de partenaires pertinents.

Le premier indicateur traduit le fait qu'ASTRID visait une finalisation des études de conception en 2019, selon le planning révisé, avec comme points de passage les trois principaux jalons suivants :

- Livraison en 2012 de la première phase de l'Avant-Projet Sommaire (AVP1) – formulation des premières hypothèses de stratégie de démarrage du cœur d'ASTRID ;
- Finalisation en 2015 de la deuxième phase de l'Avant-Projet Sommaire (AVP2) – obtention d'un avant-projet sommaire complet et cohérent permettant de définir les caractéristiques d'ASTRID et d'estimer le budget pour la suite du programme ;

- Achèvement en **2019** de l'**Avant-Projet Détaillé (APD)** – **coût prévisionnel précis** de l'ensemble des travaux et **arrêt sur les différentes options de design et technologiques** à privilégier.

Trois **sous-indicateurs de performance** furent prévus afin de mesurer ce premier indicateur :

- Le **pourcentage d'avancement** des études de conception d'ASTRID au cours de chacune des différentes phases du projet ;
- L'**écart en mois** entre la date constatée de complétion des études de chaque phase du projet et celle initialement prévue ;
- Le **rapport** entre le **coût constaté** des études de conception d'ASTRID pour chacune des phases et le **coût initialement prévu**.

Le second indicateur reflétait la **nécessité de s'assurer de la pertinence des choix techniques et économiques** réalisés sur le programme ASTRID, via des **collaborations** avec des **industriels** parmi les producteurs d'électricité et les concepteurs / réalisateurs de réacteurs nucléaires, mais également avec des **établissements de recherche étrangers**. Ainsi, les objectifs visés étaient de parvenir selon les phases du projet à :

- Un **bon équilibre** entre les **financements du PIA** et **ceux apportés par les partenaires** du programme (hors CEA) ;
- Une plus forte **approbation** par les **entreprises partenaires** de la pertinence du programme en vue d'une **industrialisation ultérieure**.

Enfin, les **deux derniers indicateurs** étaient en lien avec la **volonté d'un retour sur investissement pour l'Etat**, s'inscrivant sur le long terme dans la mesure où les **perspectives d'applications industrielles** et / ou **commerciales** des programmes de **recherche et d'innovation dans le nucléaire** ne peuvent être envisagées qu'à un horizon lointain. Dans ce contexte, le CEA s'engageait à proposer au comité de suivi qui serait mis en place pour la gestion du programme :

- Un **dispositif de rémunération** par les **industriels** de toute **exploitation à des fins industrielles ou commerciales** des résultats issus des études ou travaux financés par le PIA (en tenant compte des apports des partenaires industriels au programme ASTRID), devant être finalisé au plus tard avant début 2015 ;
- Avant la fin 2017 (date initiale prévue pour la fin de la phase de conception), les **partenariats envisagés** ainsi que le **plan de financement** pour la phase de réalisation d'ASTRID.

Evolution des indicateurs de performance par rapport à la convention

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 les connaissances générées par le programme ASTRID**. Cette démarche devait passer par la réalisation d'un **dossier de fin de convention**, servant d'outil de recueil et de conservation des connaissances disponibles à la fin du programme.

Par ailleurs, comme courant 2012 une partie du budget du programme ASTRID fut **réorientée au sein du PIA au profit d'action de sûreté à la suite de l'accident de Fukushima de mars 2011**, ces inflexions budgétaires conduisirent le CEA à proposer au Comité de Suivi un nouveau **planning de déroulement de l'action**, incluant un scénario **d'allongement des phases d'APS et d'APD d'un an chacune**. En juin 2012, il a également été décidé de **mettre un terme aux études de faisabilité sur les ateliers de fabrication de combustible chargé en actinides mineurs (ALFA)**.

2. Un projet ambitieux et techniquement en pointe

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

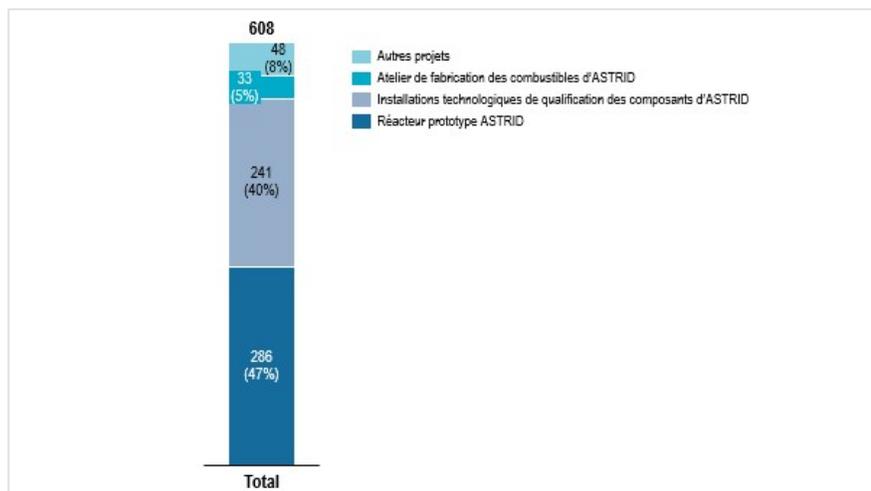
2.1.1 6 sous-programmes, dominés par la conception du prototype et des installations technologiques

Le programme ASTRID comportait initialement **6 sous-programmes** :

- La conception du réacteur ASTRID lui-même, en visant à aller jusqu'à **l'avant-projet détaillé** – hors toute construction – avec 3 phases :
 - La **phase 1 de l'avant-projet sommaire (AVP1)** d'une durée de 2,5 ans : son but était de disposer d'une première image du réacteur ASTRID, de certaines options techniques encore ouvertes, d'une première estimation financière du chiffrage des différentes options, et d'un calendrier pour les prochaines phases ;
 - La **phase 2 de l'avant-projet sommaire (AVP2)** d'une durée de 3 ans : son objectif était d'aboutir à un avant-projet sommaire définitif associé à son dossier d'options de sûreté ;
 - **L'avant-projet détaillé APD ou Basic Design** ;
- La conception de **l'Atelier de Fabrication des Combustibles (AFC)** jusqu'à la phase de l'avant-projet détaillé incluse – hors toute construction ;
- La **réalisation et la rénovation d'installations technologiques associées** de qualification des composants (installations de qualification à grande échelle et petites installations expérimentales) ;
- La **rénovation de la maquette critique MASURCA** (réacteur de recherche dédié aux études neutroniques) 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)** – hors études d'avant-projets sommaire et détaillé et hors construction.

En analysant les coûts de ces différents sous-programmes, on constate que ce sont la **conception du réacteur prototype ASTRID** ainsi que la **R&D et la rénovation des installations technologiques de qualification des composants ASTRID** qui ont **absorbé la quasi-totalité des financements du PIA** (avec respectivement 47% et 40% du total des dépenses réalisées).

Figure 11 : Analyse des macro-postes de coût du programme ASTRID [m EUR, 2010-2019]



Les montants indiqués dans la **figure 11** concernent **uniquement les dépenses propres aux financements du PIA**. Il est à noter que **deux montants peuvent être utilisés** pour désigner le total des fonds du PIA mobilisés dans le cadre de cette action :

- **608 m EUR** en incluant **l'ensemble des taxes** : ce montant est le plus pertinent à prendre en compte dans les analyses concernant les financements du programme, car il :
 - Renvoie aux **ordres de grandeur** mentionnés dans la **convention du programme ASTRID** entre le CEA et l'Etat ;
 - Permet un **calcul plus fin et comparable** aux autres actions du PIA 1 de **l'effet de levier** et du **taux d'utilisation des crédits du PIA** ;
- **586 m EUR** en **excluant la TVA directement récupérable par l'Etat** (le CEA étant soumis à un montant de TVA d'environ 4% sur l'ensemble de ses paiements, en raison d'une spécificité de son statut d'opérateur public). Ce montant sera utilisé pour **l'ensemble des analyses propres aux dépenses du programme**, dans la mesure où il reflète les sommes directement payées par le CEA

2.1.2 Un programme avec différentes phases de conception du réacteur

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 le design et enfin à **ajuster les estimations de coût de construction** d'une première version du **démonstrateur**. Celui-ci était destiné à démontrer 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 des réacteurs commerciaux de 4ème génération** au cours du 21ème siècle.

La partie préparatoire de la **première phase d'avant-projet (AVP1)** eu lieu entre début 2010 et mars 2011. Elle a été consacrée à **structurer l'avant-projet** à la fois au sein du CEA mais aussi avec les premières entreprises partenaires. Elle fut suivie de la seconde partie de l'AVP1, ayant pour but **d'analyser les options ouvertes en termes d'innovation** afin d'effectuer le **choix du design** de référence fin 2012 (échéance fixée par la loi de 2006). Cette phase fut aussi mise à profit pour **initier un dialogue avec l'Autorité de sûreté** sur les objectifs et les orientations de sûreté. Elle se termina fin 2012 par l'entrée dans la phase 2 par suite du retour positif des tutelles, avec la livraison d'une **importante documentation d'ingénierie et de résultats de R&D**, et en particulier d'un dossier d'orientations de sûreté soumis à l'ASN en juin 2012. Lui succéda ensuite à partir de janvier 2013 une **seconde phase d'avant-projet (AVP2)**, visant à disposer d'un **avant-projet sommaire complet et cohérent**. Cette phase avait comme objectif de conforter la conception du réacteur en finalisant les choix d'options technologiques, et d'obtenir une **estimation plus étayée du coût et du planning** afin d'alimenter la prise de décision concernant la **poursuite des études de conception**. Fin 2015, conformément au calendrier prévu et dans les budgets alloués, le CEA a **rendu compte à ses tutelles de la fin de cette phase d'avant-projet sommaire**, et fut alors autorisé à réaliser les études d'un **avant-projet détaillé (APD)** sur la période **2016-2019**.

L'APD débuta en 2016 par une **période de 9 mois** destinée à la confirmation des choix d'options. Suivi ensuite une phase de conception détaillée proprement dite à partir d'octobre 2016. A cette date, l'objectif visé concernant le **lancement de la construction du réacteur était 2025** (en raison du besoin avant cette date de **finaliser le basic design** du réacteur). La **durée estimée du chantier** était de **11 ans**, avec une forte optimisation rendue possible en raison des **nombreuses innovations** réalisées au cours du programme ASTRID (techniques, de méthodes de travail, d'outils de calcul scientifique, etc.).

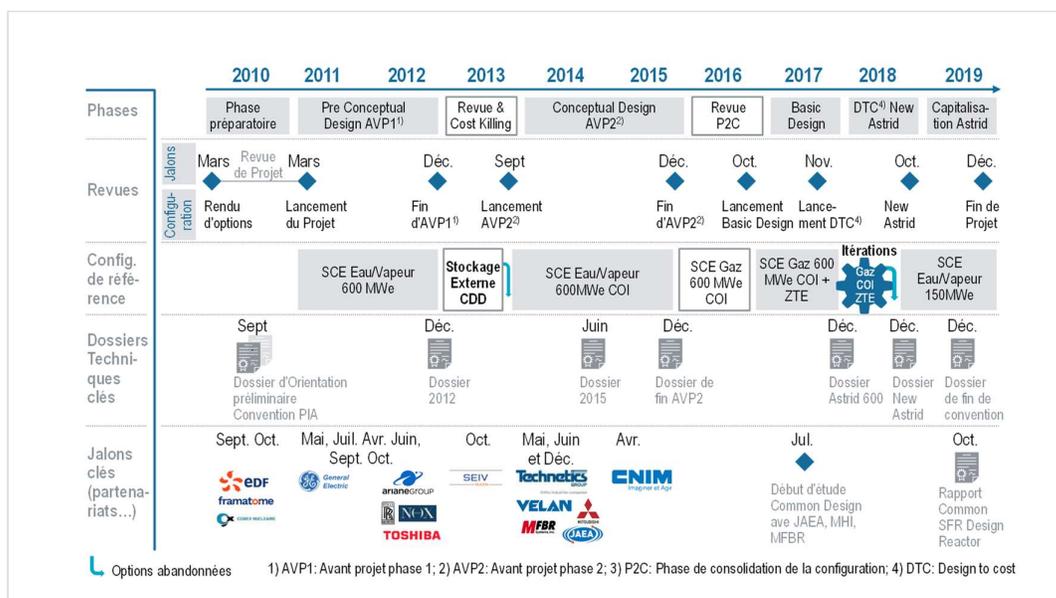
A la fin 2017, afin de **réduire le coût global d'investissement du projet**, fut décidée la diminution de la puissance du réacteur et son intégration dans un large programme de simulation, pour en conserver les capacités de démonstration vis-à-vis de la filière et de la fermeture complète du cycle des matières. Ce programme incluait ainsi la définition d'un réacteur de puissance inférieure à celle de **600 MWe** initialement prévue, appelé **New ASTRID (ou ASTRID 150)**. La **période 2018-2019** fut consacrée au design de ce nouveau réacteur et a abouti à un **dossier d'esquisse**. L'objectif restait d'être en

capacité de déployer une filière de RNR-Na sûre, performante et compétitive, mais dans une optique de déploiement industriel à plus long terme (dans la seconde partie du 21ème siècle et non à partir de 2040).

Enfin, à fin 2018, dans le cadre de la préparation du **Programme Pluriannuel de l'Energie (PPE)**, l'Etat avec les industriels français et le CEA confirmèrent la nécessité de poursuivre un programme de R&D sur la 4ème génération mais décidèrent d'un **report de la réalisation d'un démonstrateur** à la seconde moitié du siècle. Aussi, et conformément à sa convention signée en 2010, le programme ASTRID **s'acheva fin 2019**. Afin de préparer les **prochaines étapes** du développement des RNR-Na, le CEA a mis en place :

- D'une part des **actions de Knowledge Management (KM)** dans le courant de l'année 2019 afin de préserver les acquis des 10 années du Programme ASTRID ;
- D'autre part un **programme de R&D** démarrant en 2020 afin **de maintenir ses compétences** tout en **poursuivant les recherches sur les verrous scientifiques** les plus importants.

Figure 12 : Calendrier du programme ASTRID [début 2010 à fin 2019]



2.1.3 Des évolutions de configurations techniques auxquelles le CEA a su s'adapter

Au cours du programme, trois configurations majeures du prototype ont fait l'objet d'un remontage complet :

- **ASTRID 600 Vapeur**, terminé fin 2015 à la fin de phase d'avant-projet sommaire ;
- **ASTRID 600 Gaz**, configuration à un niveau d'APD moyen à fin 2017 ;
- **New ASTRID (ou ASTRID 150)**, configuration à l'état d'esquisse à fin 2019.

Les principales solutions techniques de référence d'**ASTRID 600 Vapeur** en fin d'APS étaient les suivantes :

- Une puissance de 1500 MWth, soit environ **600 MWe** ;
- Un cœur à **faible effet de vidange sodium** (dit CFV), avec une température entrée cœur de **400 °C** et une température de sortie de **550 °C** ;
- Un **combustible à base d'oxyde mixte (U, Pu)O₂** ;
- Un **circuit primaire intégré** avec cuve interne conique ;
- Quatre **circuits intermédiaires en sodium** ;

- Un **récupérateur interne de corium** ;
- Un **stockage interne** associé à une manutention externe du combustible en gaz ;
- Un **système de conversion** d'énergie à l'Eau-Vapeur.

Son **architecture de référence** comprenait :

- **3 pompes primaires** ;
- **4 échangeurs intermédiaires** ;
- **4 circuits secondaires indépendants** associés à 4 générateurs de vapeur.

Le gaz étant **inactif avec le sodium** (contrairement à l'eau), est apparu au cours du programme l'opportunité pour des raisons de sécurité de passer à un **système de conversion d'énergie à gaz** (et non plus à Eau-Vapeur). Les caractéristiques principales d'**ASTRID 600 Gaz** étaient globalement similaires à celles d'ASTRID 600 Vapeur, excepté pour le **système de conversion d'énergie** et les **circuits secondaires**. Parmi les éléments qui structurent le système de conversion d'énergie à gaz, on notera :

- Un **cycle fermé de BRAYTON** en azote pur à 180 bars ;
- Une **configuration multi-lignes** ;
- Des **échangeurs de chaleur sodium gaz** spécialement conçus et testés par le CEA ;
- Des **compresseurs, échangeurs** et récupérateur optimisant le cycle et augmentant son rendement ;
- Deux **salles des machines spécifiques**, contenant chacune une **turbine**, optimisées pour réduire les masses et les coûts.

De plus, une **reconfiguration en profondeur des architectures des composants, systèmes et aménagement** des bâtiments s'est opérée, principalement du fait de la configuration en cycle de conversion au gaz, de la refonte des dispositions de manutention et de transfert de combustible, et de l'architecture des systèmes d'évacuation de puissance résiduelle.

Jusqu'au début de l'année **2017**, le programme portait sur un réacteur de puissance **600 MWe**, configuration choisie sur la base de trois critères :

- La **validité de la qualification** de certains composants était considérée comme transposable jusqu'à un **facteur 3** : la puissance d'un réacteur commercial étant dans la gamme **1000 à 1.500 MWe**, il était donc nécessaire d'avoir une puissance supérieure à respectivement **330 - 500 MWe** ;
- La volonté que les **coûts d'exploitation du réacteur** soient couverts par la vente d'électricité ;
- L'objectif de **recycler une quantité donnée de plutonium**, sur la base de données fournies par EDF.

L'éloignement dans le temps du besoin (**pas de tensions sur le marché de l'uranium**) ainsi que le coût important d'un réacteur d'une telle puissance (montant trop élevé par rapport aux contraintes budgétaires) ont abouti à des **modifications majeures du cahier des charges technique d'ASTRID** à partir de 2017 (en lien avec le décalage à la seconde moitié du **XXI^{ème}** siècle des objectifs d'industrialisation de ce type de réacteur) :

- Volonté de **réduire de moitié** le coût de construction du réacteur ;
- Diminution de la **puissance du réacteur** ;
- Intégration de ce réacteur à un **programme de simulation** à caractère plus expérimental (et non industriel), en soutien à la maturation des technologies du RNR-Na ;

Ces différentes modifications ont abouti à la configuration **New ASTRID** (ou **ASTRID 150**), avec un choix du cœur porté sur une technologie **de combustible déjà qualifiée**, et aux caractéristiques techniques suivantes :

- Une puissance de **400 MWth**, soit environ **150 MWe** ;
- Un **cœur** avec un **faisceau homogène** de type SUPERPHENIX afin de minimiser les risques et le besoin de qualification ;
- **2 pompes primaires** courtes ;
- **2 échangeurs intermédiaires** courts associés à une seule **Boucle Circuit Secondaire** ;
- Des structures de supportage du cœur et un **Bouchon Couvercle Cœur** ;

- Des **fermetures supérieures** avec un seul bouchon tournant et une dalle en inox ;
- Une **cuve principale** et une **cuve de sécurité** ;
- Une **cuve interne conique** ;
- Un **récupérateur de corium** en cuve ;
- Des **dispositifs de mitigation** analogues aux configurations précédentes.

Le choix de cette nouvelle configuration a eu de **nombreux impacts opérationnels** non seulement sur le CEA mais également sur l'ensemble de ses partenaires. En effet, de **multiples options technologiques** ont dû être réétudiées en raison des changements majeurs apportés au cahier des charges technique.

Figure 13 : Données clés des différentes configurations techniques envisagées au cours du programme

[Confidentiel]

2.1.4 Une mutualisation des efforts du CEA et de ses partenaires (notamment Orano) sur le cycle et l'atelier de fabrication du combustible

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 du cycle du combustible telles que l'**Atelier de Fabrication du Combustible** (AFC) et les **installations de retraitement de combustible irradié** ont été prises en compte dans le Programme ASTRID. Les actions relatives au cycle avaient pour principaux **objectifs** de :

- **Permettre l'approvisionnement du démonstrateur en combustible** avec un chargement initial d'environ 10 t / an et un taux de renouvellement d'environ 6 t / an ;
- **Prendre en compte le combustible déchargé**, et en particulier assurer son traitement et son recyclage dans le réacteur ASTRID ;
- **Préparer les expériences de transmutation** faisant partie des missions du programme (à une échelle restant à définir).

AREVA NC (aujourd'hui ORANO) et le CEA ont collaboré pour réaliser les études d'ingénierie de la phase **d'Études Préliminaires** (EP) de l'AFC d'ASTRID. Le **projet AFCE** (Atelier de Fabrication des Cœurs d'ASTRID) fut ainsi lancé dans ce cadre afin **d'étudier la faisabilité et la fabrication du cœur d'ASTRID**. Il couvrait non seulement le **combustible** mais aussi **d'autres éléments du cœur liés à la problématique du combustible**, tels que les gaines, les fils espaceurs, le tube hexagonal ainsi que les céramiques réflectrices ou absorbantes. AFCE a porté deux contrats de collaboration avec ORANO :

- Le **contrat AFC**, visant à étudier la **faisabilité d'un nouvel Atelier de Fabrication du Combustible** couvrant le champ procédé, les coûts, et la vision industrielle (site et stratégie), prenant la suite de premières études antérieures au programme menées dès 2006 ;
- Le **contrat Aiguilles**, avec pour objectif d'étudier la **faisabilité de la fabrication**, de 61 aiguilles prototypiques pour qualifier quelques options techniques 'combustible' choisies pour ASTRID. C'est dans le cadre de ce contrat (et un accord spécifique qui le précédait) qu'ont été définis et déroulés les **deux essais de fabrication industrielle** (en 2015 et 2016).

Sur la base du **retour d'expérience tirés des fabrications industrielles réalisées pour les réacteurs Phénix et SuperPhénix**, des axes de R&D ont en parallèle été identifiés pour faire évoluer le schéma de procédé de fabrication des **pastilles de combustibles RNR** pour en améliorer les performances et la sûreté.

Dans le cadre de ce projet, la fabrication et la faisabilité des matériaux constitutifs des assemblages combustibles ont été étudiées, en croisant les **exigences du concepteur** et les **possibilités offertes par les technologies et le tissu industriel existant**. AFCE a obtenu les résultats suivants :

- Il a permis de démontrer que la fabrication et la faisabilité du **fil espaceur** et des **tubes de gainage** sont accessibles industriellement, avec des produits obtenus **globalement conformes aux spécifications** (même si quelques points doivent encore être approfondis) ;

- Les **pastilles céramiques** ont été **fabriquées avec des gammes de fabrication expérimentales** sur des outils pilotes ou semi industriels (les spécifications de fabrication étant respectées à la fin du programme)
- Le **tube hexagonal** n'a pu quant à lui être fabriqué avec la nuance spécifiée et à l'échelle 1, mais des procédés de fabrication ont été testés, y compris un procédé innovant ;
- Au niveau technique, il a été montré que la construction d'un **AFC entièrement neuf sur le site de La Hague** était le scénario le plus intéressant et offrant le plus de flexibilité tout en minimisant les risques et les contraintes logistiques liés à la gestion de la matière première combustible.

Il est à noter que la **mutualisation des efforts entre le CEA et son partenaire industriel** a permis de mettre en place une démarche **itérative et constructive** permettant de converger sur les **solutions technico-économiques optimales** et de minimiser les divergences.

2.1.5 ASTRID a permis de développer différentes plateformes et installations

La convention du programme prévoyait le financement de la **remise à niveau de grands équipements de R&D et de qualification technologique**, et en particulier :

- La **réalisation** et la **rénovation** d'installations technologiques de **qualification des composants du réacteur ASTRID** (installations de qualification à grande échelle et petites installations expérimentales) ;
- La rénovation de la **maquette critique MASURCA** (réacteur de recherche dédié aux études neutroniques) de qualification du cœur ASTRID.

Le CEA a donc lancé dans le cadre du programme ASTRID les études et la réalisation des installations répondant aux **besoins de qualification d'ASTRID** :

- La rénovation de la plateforme **PAPIRUS** ;
- La rénovation de la plateforme **GISEH** ;
- Le projet d'installation **CHEOPS** ;
- Le projet de rénovation de l'installation **MASURCA** ;
- Le projet d'installation **PLINIUS** ;
- La plateforme technologique **HERA**.

La **plateforme PAPIRUS** (PArc de Petites Installations de Recherche sur l'Utilisation du Sodium) regroupe les **moyens d'essais en sodium** en soutien aux besoins de R&D du projet ASTRID. Cette plateforme (qui existait antérieurement au programme) a fait l'objet entre 2010 et 2019 de nombreux investissements sur ses moyens d'essais (rénovations / constructions), pour :

- **Améliorer la technologie** (composants, instrumentations, ...) des réacteurs actuels ;
- Développer celle des **réacteurs du futur** pour toutes les filières de réacteurs, et en particulier pour la filière des réacteurs au sodium.

En 2019, la plateforme comptait une **vingtaine de boucles sodium** et de **boîtes à gants sodium** en exploitation.

La plateforme **GISEH** (Groupement des Installations pour l'Expérimentation Hydraulique), située à Cadarache, regroupe les **installations en fluide simulant**. Cette plateforme sert à accueillir **des maquettes de différents composants du réacteur ASTRID** (à partir du moment où elle fut opérationnelle en 2014). En effet, le sodium étant délicat à mettre en œuvre (**opacité** et de **réaction exothermique avec l'eau**), un **fluide simulant** est en général employé. Il s'agit **d'eau** dans le cas de cette installation, car ses **propriétés physiques** en termes de densité et de viscosité sont **proches de celles du sodium** à la température de fonctionnement d'un réacteur.

Le projet d'installation **CHEOPS** (Circuits et Halls d'Essais de technOlogie et comPosants en Sodium) était supposé abriter des **boucles d'essai mettant en œuvre du sodium liquide**, pour tester des **composants en sodium statique ou dynamique**. Ainsi, il avait pour but de **valider l'innovation** apportée à certains composants du réacteur ASTRID en répondant aux besoins suivants :

- Qualifier le **système de conversion d'énergie gaz** (échangeur sodium-gaz) ;

- Mener des **études de R&D en sodium statique ou dynamique** et en température, dans des conditions représentatives des conditions de fonctionnement d'ASTRID.

Ce projet fut **arrêté en 2018** dans la mesure où les prévisions de financement inscrites dans le budget quinquennal 2018-2022 de l'Etat ne permettaient pas de **couvrir l'ensemble des dépenses de construction**.

L'installation nucléaire **MASURCA** (MAquette de SURgénérateur à CAdarache) est une **maquette critique** dédiée aux **études de physique neutronique** en soutien aux RNR, et qui fut mise en service en 1966. La rénovation de cette installation était un **élément constitutif du programme**, car indispensable pour la **qualification du futur cœur** dit « CFV » du prototype ASTRID. Ce projet de rénovation visait à :

- **Moderniser cette installation** par rapport aux **dernières exigences de sûreté** dans un contexte post-Fukushima ;
- **Définir, mettre à niveau et acquérir** des « éléments de simulation » ou « matières » nécessaires aux programmes expérimentaux de **qualification neutronique des cœurs d'ASTRID** ;
- **Rénover les équipements expérimentaux** nécessaire à la réalisation de ces programmes expérimentaux.

La **réorientation du programme en 2017**, avec la **conception d'un réacteur de puissance significativement inférieure à la puissance envisagée pour ASTRID** (dans la gamme 100 à 200 MWe), a offert la possibilité au CEA d'opter pour le choix d'un cœur RNR classique (au regard des exigences sur les comportements en situation accidentelle). Elle a donc rendu **caduc le besoin de réalisation à court terme** du programme expérimental lié à cette installation, et par conséquent son besoin de rénovation.

Le projet d'installation **PLINIUS-2** (Platform for improvements in nuclear industry and utility safety) est une **plateforme d'essais** destinée à **qualifier des dispositifs de mitigation et de maîtrise du corium** (dans le cadre de la **gestion d'accidents graves affectant un réacteur**). Elle visait initialement à satisfaire les besoins des réacteurs de **génération 4** (en particulier ceux au sodium comme ASTRID), mais aussi ceux des **réacteurs de générations précédentes** refroidis à eau. Par rapport à l'installation PLINIUS existante au CEA, cette plateforme :

- Permettait d'ajouter toutes les **fonctionnalités liées aux essais en sodium** ;
- Était plus **représentative de l'ensemble des situations potentielles d'accident réel**, car couvrant une plus grande **masse de corium** (jusqu'à 500 kg) ainsi que **plusieurs types de réacteurs** (à eau, à métal liquide).

Mi 2019, le CEA a décidé de **surseoir au lancement de la réalisation de l'installation PLINIUS-2**, en concertation avec son partenaire EDF, pour deux raisons principales :

- **L'éloignement dans le temps** de la perspective de déploiement des RNR industriels et d'un moyen de qualification des dispositifs de mitigation d'un accident grave associé ;
- **L'absence de besoin fort à court terme** de ce type d'installation pour les réacteurs à eau du parc électronucléaire français de générations 2 et 3.

La plateforme technologique **HERA**, au CEA de Marcoule, a été développée dans le cadre du **projet AFCOE** (Atelier des fabrications du cœur d'ASTRID). Cette plateforme technologique était destinée à être le **lieu d'essais et de fiabilisation** sur les problématiques liées à la **fabrication et à l'utilisation du combustible du futur réacteur** (aiguilles, bouchons, etc.). Elle est aujourd'hui **disponible** pour **réaliser des essais** de validation d'équipements et **fabriquer des aiguilles combustibles postiches**, mais aussi répondre à des **demandes spécifiques** sur d'autres projets du CEA en lien avec la fabrication et à l'utilisation de combustible.

2.1.6 **ASTRID a stimulé le développement de nouvelles méthodes de travail pour l'ensemble de la filière nucléaire française**

ASTRID a vu la mise en œuvre de **méthodes de travail en rupture** avec les générations précédentes de design de réacteur nucléaire. Ainsi, le CEA et ses partenaires ont fait le choix de déployer des méthodes de travail de pointe : mode de management visuel (visualisation et cartographie 3D, salles immersives, ...), nouveaux outils de gestion et de

management, etc. L'ensemble de ces méthodes sont autant de **méthodologies d'innovation** qui pourront servir pour rapidement développer de **nouveaux projets nucléaires**.

De manière pratique, on constate une **bonne appropriation de ces méthodes de travail** – en particulier par les **personnels du CEA**. Ainsi, elles ont permis de considérablement **rapprocher les équipes de cet organisme des meilleures pratiques** des industriels (point noté par différentes parties prenantes du programme), notamment en termes de :

- Démarche de **développement technologique** ;
- Flexibilité des **démarches de recherche engagées** ;
- **Transfert à l'industriel** d'une technologie CEA.

Méthode de « Gestion de projet »

Un **référentiel** du **programme** en termes **d'organisation** a été mis en place dès le démarrage du projet, avec plusieurs documents clés :

- Un **plan de management**, présentant les dispositions de management pour atteindre les objectifs de performances techniques, de sûreté, de coût et de délais du projet ;
- Une **spécification de management** décrivant les exigences associées au pilotage du projet ASTRID ;
- Une **logique de déroulement**, clarifiant le séquençage du projet et identifiant les processus réglementaires ainsi que les principaux documents d'études techniques à produire pour l'atteinte des jalons du projet ;
- Une **note d'hypothèses** de la planification du projet ;
- Une **analyse des risques du projet**, associée à un plan de maîtrise des risques.

Ce cadre s'est accompagné de la mise en **place d'outils et de processus de pilotage**, parmi lesquels on distingue :

- Des **réunions d'avancement périodique** organisées entre les différents partenaires et le CEA (suivi mensuel, COPIL trimestriels, ...) pour le suivi technique, contractuel et financier ;
- Des **indicateurs mensuels synthétiques** de suivi du projet au travers du temps ;
- Une **Gestion Electronique de la Documentation (GED)** ayant permis d'identifier, de classer et d'organiser l'ensemble de la documentation du projet constituée d'environ 18000 documents ;
- Un **processus de suivi et de vérification des livrables** des partenaires rigoureux et optimisé.

Ingénierie Système (IS) et concurrente

Cette méthodologie désigne une démarche générale **englobant l'ensemble des activités** adéquates pour **concevoir, faire évoluer et vérifier un système**, afin d'apporter une **solution économique et performante** à un besoin tout en satisfaisant l'ensemble des parties prenantes. En effet, l'organisation projet se composait :

- D'une **équipe CEA intégrée constituée** de spécialistes métiers ;
- **D'industriels** apportant la maîtrise de **produits** et/ou de **technologies spécifiques**.

Il était donc nécessaire de définir des **méthodes de gestion de la configuration et des interfaces** entre les produits des différents partenaires (par rapport aux exigences fonctionnelles des différentes phases du programme). La gestion de configuration regroupe le fait de **tracer la description technique du produit ASTRID et l'ensemble des modifications apportées** au cours de son évolution via un **processus de gestion des évolutions et impacts associés**. Cette gestion des interfaces entre les différents systèmes étudiés et conçus par les partenaires a en particulier été mise en place pour :

- Permettre la **traçabilité** et la **justification** des choix de configuration ;
- Garantir les **données techniques de référence** et la **cohérence** du **design** d'ensemble ;
- **Statuer des modifications** lors de l'avancement des études de conception en ingénierie simultanée.

En complément de ce **pilotage des interfaces**, le projet ASTRID a renforcé la **collaboration directe** entre les partenaires via la mise en place de **Groupes de Travail en Mode Intégré** (GTMI) au cas par cas, afin de rendre plus dynamiques les échanges techniques entre leurs ingénieries.

Management AGILE

Le programme ASTRID a marqué le premier cas d'utilisation de **méthodes de gestion agiles** pour la filière nucléaire française. Cette méthodologie fut déployée à partir de janvier 2018, lors de la **phase d'étude d'architecture générale du projet New ASTRID** et alors que le programme était amené à devoir faire rapidement évoluer **l'ensemble du design du projet** par suite de **réorientations majeures de son périmètre**. Cette méthode de gestion repose sur un **cycle de développement court** (par période de 15 jours), avec **des réunions d'échange bimensuelles** visant à :

- Questionner les **options** des différents partenaires ;
- Progresser par une **succession de petits choix techniques** sur le développement du projet ;
- Améliorer **l'adhésion des différents acteurs** ;
- **Limiter l'effet tunnel** lié au caractère long terme du projet.

Cette méthode repose également sur le fait de désigner pour **chaque système de l'Arborescence Produit** :

- Un **pilote technique** en charge de la conception du produit ;
- Un **"costeur"** apportant la vision coût et remettant en question les choix de conception afin d'éviter les conservatismes ;
- Un **référént sûreté**, en charge de la juste déclinaison des exigences de sûreté

Design To Cost (ou CCO : Conception à Coût Objectif)

L'année 2018 a vu l'introduction d'une nouvelle méthode de travail : le **design to cost**. Cette méthode de travail innovante pour la filière nucléaire française a été développée entre les différentes parties prenantes du programme afin de pouvoir **modifier drastiquement en une année** le projet industriel derrière ASTRID et **diviser de moitié les coûts de construction** du réacteur. Cette démarche consiste à partir d'un **objectif cible en termes de coûts** (~50% des précédentes estimations de coût dans le cas d'ASTRID), pour aboutir à des caractéristiques techniques spécifiques, avec deux principaux leviers :

- Le choix de **solutions moins chères** et / ou plus **matures** ;
- **L'externalisation** de fonctions ou de systèmes, structures ou composants (en intégrant la prise de risques supplémentaires provisionnés par ailleurs).

Cela a notamment abouti à plusieurs décisions telles que :

- La **baisse de la puissance du réacteur**, de 600 MWe à une valeur comprise entre 100 et 200 MWe ;
- La **baisse du coefficient de disponibilité** du réacteur ;
- L'abandon de la **ségrégation des fonctions par bâtiment**.

Product Lifecycle Management (PLM)

L'utilisation de cette méthodologie représente également une première pour l'industrie nucléaire française. Il s'agit d'un **outil digital combinant les différents documents clés** du projet, afin que tous les acteurs puissent suivre au sein de la même interface l'actualisation de l'arborescence produit, notamment pour la configuration produit. Il fut déployé en **début de phase Basic Design** à un moment où les outils de management de la configuration déployés pendant la phase d'AVP (1 et 2) montrèrent leurs limites. En effet, la gestion en configuration des **14 partenaires, 1.700 produits, 10.800 performances** et **17.000 données d'interface** n'était plus possible avec de simples tableurs Excel, sans compter les **difficultés de mise à jour** et de **garantie de cohérence** entre les fichiers.

La mise en place d'un PLM a permis de :

- **Gérer les évolutions de configurations**, en définissant une configuration initiale puis en suivant les évolutions des fonctions, exigences, produits, données techniques et documentation ;
- **Capitaliser l'ensemble des données techniques** du projet.

Knowledge Management

Le « Knowledge Management » (KM) regroupe l'ensemble des **initiatives**, des **méthodes** et des **techniques** permettant de **capitaliser les connaissances acquises au cours d'un projet**. L'objectif du KM ASTRID était de **valoriser le savoir scientifique et organisationnel acquis pendant les 10 ans de la durée du programme** et de l'intégrer dans un système d'information dans le but de permettre la remontée en compétences rapide d'une future équipe projet, en étant compréhensible et accessible pour un public « technique » amené à reprendre les études.

ASTRID a vu une forte innovation des procédés de KM, avec notamment la **production d'une centaine de vidéos** (sous forme de MOOC) et d'une **quarantaine de notes de synthèse à usage interne** pour les futures générations amenées à travailler sur les RNR. Ainsi, **pratiquement toutes les thématiques liées à la conception du réacteur** ont été traitées au travers de ces vidéos et notes de synthèse :

- **Conception** de composants (générateurs de vapeur, pompe électromagnétique, vannes d'isolement ...)
- **Accidents graves** (récupérateur de corium, système de mitigation ...)
- **Fabricabilité** des matériaux du cœur ou des combustibles ;
- **Systèmes de maintenance** ou **d'inspection** en service ;
- **Organisation du projet** (REX d'organisation, démarche design to cost ...)
- **Retours d'expérience** sur les choix d'option réalisés pendant le programme ;
- **Principaux problèmes** restant à résoudre en lien avec la conception d'ASTRID.

2.1.7 Un développement de pointe sur les Outils de Calcul Scientifique

Ce programme s'est appuyé pendant tout son déroulé sur la **conception de nouveaux Outils de Calcul Scientifique** (OCS). En effet, les outils à disposition au début du programme ASTRID étaient pour la plupart d'entre eux **obsolètes**. Développés pour SuperPhénix il y a 20 ans et plus, ils répondaient aux exigences et contraintes de l'époque (en particulier la limitation des calculateurs). Leurs capacités prédictives étaient limitées et ne permettaient pas de modéliser de manière complète **toutes les configurations**.

Les objectifs étaient donc de :

- Pouvoir **disposer d'outils performants et opérationnels** pour les besoins des **études de conception** (domaine d'utilisation étendu, capacités prédictives améliorées, justesse du résultat, temps de calcul ...)
- Prendre en compte les **nouvelles exigences réglementaires** apparues dans un contexte post Fukushima ;
- Limiter les **conservatismes** à l'origine de **surcoûts parfois conséquents**.

Un **vaste programme de travail** a donc été engagé et réalisé sur la décennie du programme ASTRID, relatif au **développement d'une nouvelle génération d'OCS** capables de simuler au plus près la ou les physique(s) mise(s) en jeu. L'objectif général était de disposer d'**OCS opérationnels** et pour partie validés d'ici à la fin de l'année 2019 (la qualification des OCS devant être finalisée ultérieurement). Sur la période, chaque outil a fait l'objet d'un **plan de développement et de validation** :

- Identifiant les **données expérimentales** à disposition ;
- Mesurant les nouvelles données à acquérir en regard du besoin de validation pour l'application à ASTRID ;
- Quantifiant les incertitudes liées à cet outil.

Au total, près de **42 OCS** ont été **développés** et / ou **enrichis** au cours du programme. Ainsi, ASTRID a permis d'aboutir au renouvellement d'un **ensemble des codes de calcul** nécessaire au **design des réacteurs nucléaires RNR**. Cependant, malgré des avancées notables, un **travail conséquent** doit encore être réalisé, avec dans certains cas la **réalisation de programmes expérimentaux** pour compléter les **bases de données expérimentales** existantes.

Le programme ASTRID a permis au CEA de **mettre en œuvre les recommandations de l'ASN** concernant les démarches de validation et de qualification des OCS.

Ainsi, ces travaux ont ainsi permis de **structurer les processus de conception / qualification des OCS**, avec les étapes suivantes :

- Définition du **domaine d'utilisation des OCS**, afin de confirmer que les modèles utilisés couvrent bien les **champs d'application visés** ;
- Validation des **modèles des OCS** via une **base expérimentale** couvrant tous les domaines d'utilisation des **codes** ;
- **Quantification des incertitudes** liées :
 - Aux **limites du modèle** de l'OCS ;
 - A la **transposition d'expériences** sur des maquettes à une utilisation réelle à l'échelle du réacteur ;
- **Propagation des incertitudes** dans les calculs applicatifs.

Cette démarche, qui s'est structurée grâce à ce projet, a permis :

- Une **collaboration approfondie** avec différents équivalents du CEA à l'**international** (en premier lieu avec le Japon, également avec des acteurs aux **Etats-Unis et en Europe**) ;
- La **fiabilisation de l'ensemble des nouveaux OCS** développés pendant le programme ;
- L'extension d'une partie de ces **processus** :
 - Aux **réacteurs 3G**, via des travaux menés dans le cadre de l'AFCEN ;
 - A **certains partenaires industriels** de rang 1 (EDF et Framatome en particulier) ;
- La **diffusion de ces méthodologies** à d'autres projets au sein du CEA, via une appropriation par les personnels impliqués sur ces problématiques – avec comme **facteurs clés de succès** :
 - Un **effort de pédagogie** auprès des équipes, afin qu'elles comprennent au mieux la finalité de ces process ;
 - Un **travail important mené en interne** afin de systématiquement s'aligner sur cette démarche, pour être en mesure de présenter des **dossiers de sûreté adéquats** auprès de l'ASN ;
 - La **coordination** au sein de la **Cellule Projet Astrid** de la déclinaison de cette **méthodologie** auprès de l'ensemble des unités de R&D.

Notre rapport synthétise ci-dessous les **principaux OCS développés par famille d'application**.

Les OCS développés concernant le **comportement du combustible** et l'**assemblage** sont les suivants :

- L'outil **GERMINAL V2** pour le calcul du comportement et l'analyse mécanique des aiguilles combustibles ;
- L'outil **LICOS_{RNR}** pour le calcul des aiguilles absorbantes et des composants à géométrie complexe des assemblages combustible et des assemblages de maîtrise de la réactivité ;

- L'outil **DOMAJEUR2** pour la mécanique statique du faisceau d'aiguilles combustible au sein de l'assemblage hexagonal.

Les OCS développés concernant la **neutronique** sont les suivants :

- L'outil **APOLLO3**, qui permet de concevoir et de calculer par des méthodes déterministes les caractéristiques neutroniques du cœur RNR ;
- L'OCS **DARWIN3**, pour le calcul des grandeurs physiques d'intérêt pour le cycle : l'inventaire combustible, la puissance résiduelle, l'activité, la radiotoxicité, etc. ;
- L'outil **TRIPOLI-4**, utilisé pour la validation numérique des outils de calcul déterministes et pour certains calculs complémentaires (par exemple de type radioprotection).

Les OCS **thermohydrauliques** développés sont les suivants :

- L'outil **CATHARE-3**, pour la simulation du fonctionnement des chaudières nucléaires REP et RNR ;
- L'outil **TrioMC**, pour étudier l'évolution de la thermohydraulique du cœur à l'échelle des sous-canaux fluides entourant les aiguilles ;
- L'outil **TrioCFD**, utilisé pour décrire les grands volumes de sodium susceptibles de présenter un écoulement tridimensionnel influençant la dynamique globale du réacteur ;
- L'outil **MATHYS**, qui permet de coupler de manière générique (limitation de l'impact utilisateur) deux ou plusieurs des outils précédents (CATHARE-3, TrioMC et TrioCFD).

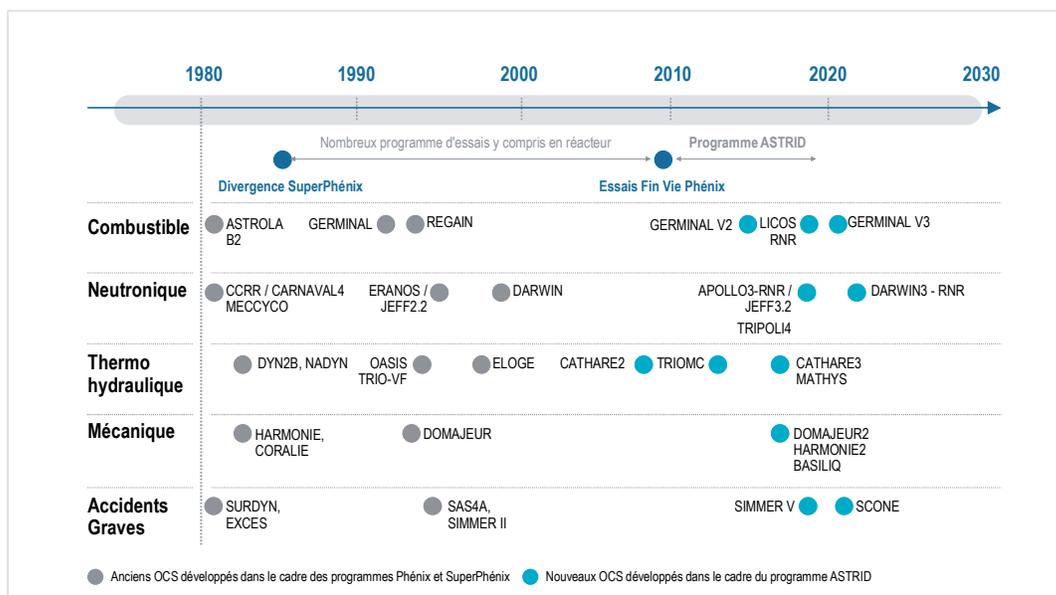
Les OCS développés liés à la **mécanique du cœur** sont les suivants :

- L'outil **HARMONIE2**, qui représente le comportement thermomécanique statique d'un cœur de RNR pour des conditions d'irradiation variées ;
- L'outil **BASILIQ**, permettant la **réalisation d'études mécaniques de conception et de dimensionnement**, et en particulier la quantification des chargements et du comportement dynamique d'un cœur de réacteur de RNR-Na en séisme

Enfin, plusieurs outils liés à la **gestion des accidents graves** ont également pu être développés :

- L'OCS **SIMMER-V** (développé conjointement avec JAEA) utilisé pour décrire tout un ensemble de situations liées aux accidents graves : changements de phase du réacteur (vaporisation du sodium, fusion et solidification du combustible et des gaines en acier), mouvements de matière (au niveau de l'aiguille, du faisceau, du cœur), comportement des bains de corium, etc.
- La **plateforme SEASON** qui échange les données entre différents OCS afin de synchroniser les calculs simulant un accident grave ;
- L'outil **SCONE**, qui simule les mouvements de sodium liquide et de vapeur, du corium liquide ou solide et de prendre en compte la fragmentation de jet, la fragmentation thermique et la déstabilisation des films vapeur.

Figure 14 : Synthèse de l'évolution des principaux OCS liés au programme ASTRID [date de finalisation de l'OCS]



2.2 Une organisation efficace, fondée sur un modèle partenarial

2.2.1 Une organisation souple au sein du CEA, qui a permis de mobiliser de nombreuses ressources internes tout en gérant les interfaces avec les partenaires

En termes d'organisation, le programme ASTRID s'est inscrit pour le CEA dans la **même démarche** que les autres programmes de recherche, avec :

- Un alignement sur les **standards de management** et de **pilotage** du CEA ;
- Un **suivi financier** selon des **processus similaires** aux autres programmes (avec toutefois la possibilité d'un suivi pluriannuel des dépenses autorisées par le PIA, permettant une plus grande flexibilité) ;
- Une **déclinaison en laboratoires / services / départements**, suivant également les modalités de ces autres programmes.

La spécificité d'ASTRID concerne le rôle d'une entité spécifique, à savoir la **Cellule Projet ASTRID (CPA)**. Cette dernière fut créée tant pour pouvoir gérer le **dimensionnement d'un nouveau type de RNR-Na** que pour répondre spécifiquement au choix fait par le CEA d'assurer le rôle d'ensemblier.

Au sein du CEA, l'organisation du projet se structurait autour :

- D'une **direction programme** qui portait la **vision stratégique du programme** et la définition et les évolutions du cahier des charges en fonction des tutelles et des différents partenaires clés ;
- D'une cellule en charge de la **coordination des différentes équipes de R&D** de chacun des sous-projets du programme ;
- De **cellules spécifiques** pour la gestion du projet AFCOE et pour les **travaux du CEA sur le site nucléaire de Marcoule** (lieu choisi pour les études d'implantation du démonstrateur ASTRID) ;
- D'une **cellule projet** jouant le rôle d'**architecte ensemblier** du projet, et en charge :
 - Du **pilotage de la maîtrise d'ouvrage** et **opérationnel** (et notamment de la coordination des différents partenaires en ingénierie) ;
 - De la **déclinaison du cahier des charges du programme**, avec un suivi financier des différents partenariats industriels et une gestion des coûts et des risques liés au programme ;
 - De **l'ingénierie du cœur du réacteur** dans la phase d'avant-projet ;

- De la **réalisation de l'ensemble des études de qualification** nécessaires pour valider les options (tant du CEA que de ses différents partenaires).

La **CPA** était en relation directe avec le **lot ingénierie cœur** pris en charge par le CEA, les **équipes de R&D** sur les domaines d'ASTRID, les différents **acteurs** travaillant sur le **cycle**, et les **différents partenaires industriels** en charge des études d'ingénierie.

L'équipe de cette **CPA** était composée :

- **D'architectes industriels**, le CEA ayant pris la décision de ne pas faire appel à un maître d'œuvre principal et d'assurer lui-même la fonction d'ensemblier ;
- D'un **responsable de management de projet** chargé de l'organisation, de la maîtrise des risques, du suivi des plannings et des coûts ;
- De **responsables de fonctions transverses** sur les enjeux majeurs d'ASTRID (sûreté, opérabilité, analyse de la valeur, programmes expérimentaux, instrumentation et ISIR) ;
- De **responsables chargés de piloter les différents lots d'études d'ingénierie** (interfaces sites, chaudière nucléaire, cœur, système de conversion d'énergie, auxiliaires nucléaires et manutention, contrôle commande et distribution électrique, génie civil).

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**. Ils soulignent également le **très fort soutien de la part de la direction du CEA** à ce projet, tant en termes de confiance que de responsabilisation et de facilitation. Les **figures 15 et 16** présentent dans le détail les **modalités opérationnelles** de la structuration du programme au sein du CEA.

Figure 15 : Organisation générale du programme ASTRID au sein du CEA

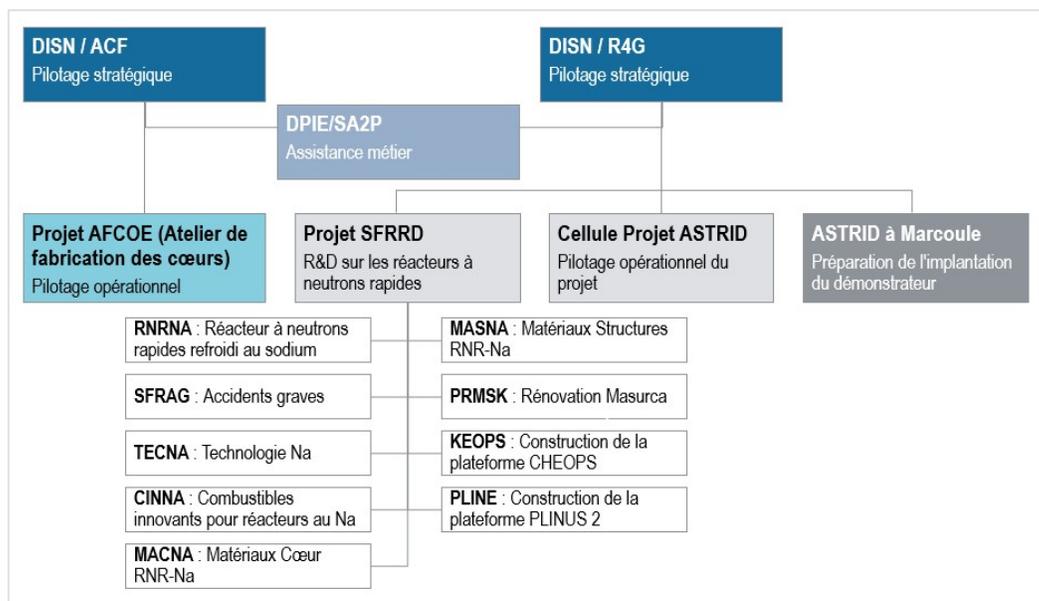
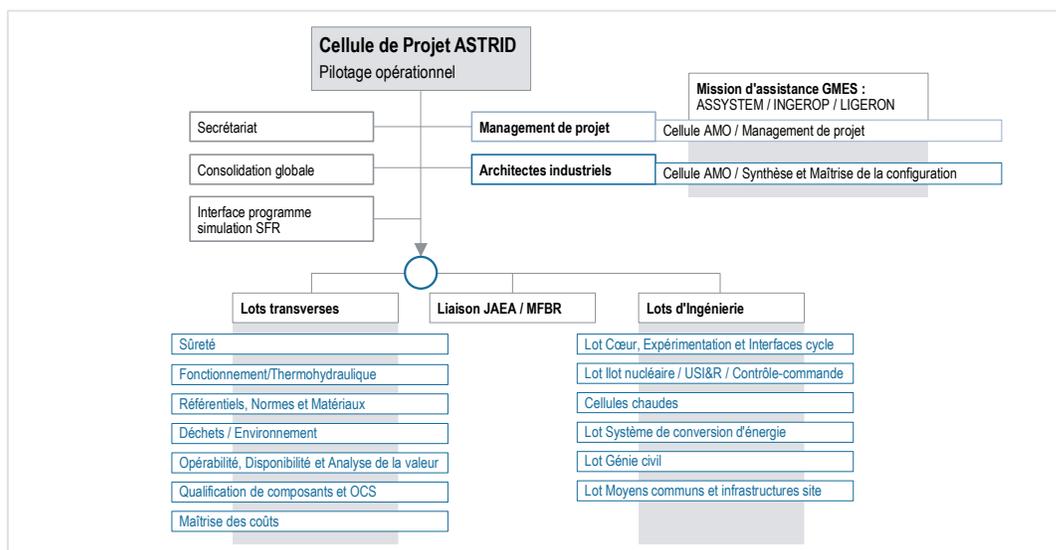


Figure 16 : Organisation de la Cellule Projet ASTRID



2.2.2 Une large mobilisation de partenaires

Le CEA a adopté au cours du programme de **nombreuses contractualisations bilatérales** avec différents partenaires présentant des expertises très variées (sur des périodes de 3 ans renouvelables). Ainsi, la **richesse du programme** s'explique par le fait que non seulement l'ensemble des **principaux acteurs de la filière du nucléaire civil français** ont été associés au projet, mais aussi que le CEA a su venir chercher des compétences sous un mode partenarial chez :

- Des entreprises françaises et européennes (**Rolls Royce** uniquement) présentes **d'autres secteurs** ;
- Des **acteurs japonais du nucléaire** ;
- Un certain nombre de **partenaires de R&D**.

Le programme a donc pu **bénéficier de la mobilisation des compétences de premier rang** aussi bien de France que de l'étranger, et s'ouvrir à d'autres visions concernant le design du prototype ASTRID. Ce dispositif a en particulier été une réussite grâce à une **grande liberté** et une **très forte confiance** dans les relations entre le CEA et les **partenaires industriels** pendant toute la durée du programme. Ce schéma a permis à ces acteurs de **travailler en vision partagée**, avec une forte concertation avant les prises de décision, qui a permis :

- Une **meilleure adhésion** au cours de l'exécution des décisions ;
- Une **responsabilisation de l'utilisation des ressources publiques** (en particulier parce que tous les partenaires industriels se sont également engagés sur le plan financier dans le programme ASTRID) ;
- Une plus grande souplesse en termes de **déclinaison opérationnelle des diverses tâches** des différents sous-projets.

Figure 17 : Organisation du programme entre le CEA et ses différents partenaires industriels

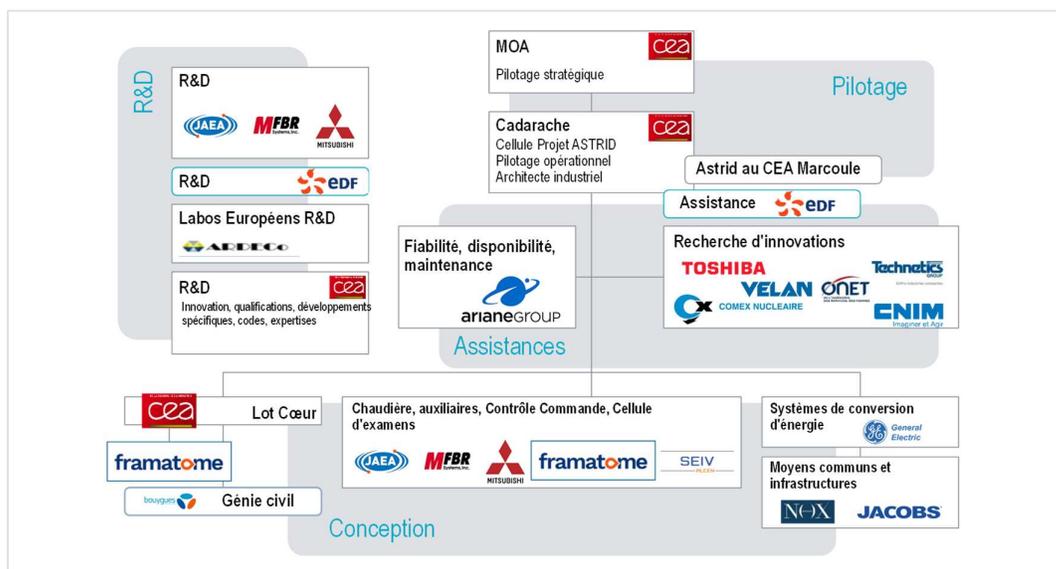


Figure 18 : Liste des thématiques de collaboration et des effectifs impliqués des partenaires industriels du CEA

Partenaire	Thématique de collaboration	Effectif impliqué dans le projet (estimation)	Date de début de la collaboration	Échéance de l'accord
	Fiabilité, disponibilité	3 à 5	01/10/2012	31/12/2019
	Ilot nucléaire (incluant codes & normes et sûreté)	100 à 170	15/10/2012	31/12/2019
	Génie Civil (y compris aspects sismiques)	5 à 10	16/04/2012	31/12/2019
	Valorisation de l'énergie et fabricabilité de composants	1,5 à 4	30/04/2015	28/02/2018
	Porteurs ISIR, mécanismes de commande	1 à 5	01/06/2011	31/12/2019
	Expertise dans le domaine des RNR	1 à 6	01/09/2010	31/12/2019
	Système de conversion d'énergie	1 à 10	26/05/2011	31/12/2019
	Design	Estimé à 50	05/05/2014	31/12/2019
	Infrastructure et moyens communs	2 à 5	01/05/2012	31/12/2019
	Echangeur sodium-gaz, manutention combustible	2 à 3	01/06/2012	31/12/2015
	Conception cellule chaude	2 à 7	01/07/2013	31/12/2019
	Conception éléments d'étanchéité	5	01/12/2014	31/12/2019
	Pompe électromagnétique circuit secondaire, visualisation sous sodium	4 à 10	13/04/2012	31/12/2019
	Conception vanne d'isolement	<4	01/06/2014	30/06/2020

A. 12 partenariats industriels diversifiés en Europe

Contexte de ces partenariats

Près de 14 partenariats industriels ont été développés tout au long du projet, dont 12 européens. En 2010, le programme ASTRID a démarré avec deux partenaires qui devaient assister le CEA sur des sujets d'ingénierie : EDF et Framatome. Puis en identifiant les besoins de renfort par rapport aux compétences de ces acteurs et à celles du CEA, le projet a sélectionné successivement d'autres entreprises et entités. La mobilisation de ces entreprises et leur engagement financier sur le projet sont à souligner, car :

- L'échelon industriel du programme portait sur le **très long terme** ;
- Leur participation à ce démonstrateur ne leur ouvrait **aucun droit spécifique** sur de futurs marchés publics.

Ainsi, c'est d'abord **Bouygues** qui fut identifié sur des **problématiques de génie civil** (optimisation de durée de chantier, tests de différentes innovations liées à l'industrie nucléaire, etc.), puis **Ariane Group** sur des sujets de **fiabilité / redondance / maintenabilité / réparabilité des systèmes**, puis au fur et à mesure les 10 autres acteurs.

Le CEA a constaté une **très bonne mobilisation des différents partenaires au cours du programme**. Ces entreprises ont quant à elles notamment pu développer des **savoir-faire et innovations complémentaires** et / ou **leur crédibilité** dans le secteur du nucléaire civil. Le **format non-contractuel** avec ces acteurs a permis de transformer la relation de travail, qui est passée par :

- Un **co-financement partiel ou total** des différents travaux confiés ;
- Un **accord bilatéral** entre le CEA et chaque partenaire sur les sujets à traiter et des volumes d'heure / enveloppes à ne pas dépasser ;
- Des **ajustements souples** pendant le programme des **livrables, méthodes de travail, sujets traités**, etc., en fonction de la **dynamique d'évolution** de chacun des sous-programmes.

L'ensemble des partenaires interrogés ont **fortement apprécié ce mode de gestion du programme**, rendu nécessaire dès le départ par l'impossibilité d'établir un cahier des charges clair en avance de phase en raison des fortes incertitudes technologiques. Ainsi ils ont souligné à l'unanimité **l'efficacité du dispositif mis en œuvre** et leur **satisfaction au regard des modalités opérationnelles** d'ASTRID. Cette organisation, en visant à éviter d'avoir une maîtrise d'ouvrage trop directive, a **responsabilisé les différents acteurs** en les poussant à offrir la **meilleure réponse possible** par rapport à des objectifs et des moyens donnés.

Description des différents partenariats

1) EDF a assuré à partir de 2010 une assistance technique à l'équipe CEA ASTRID sur des **compétences d'architecte et d'exploitant de centrales nucléaires REP et RNR**. Également, EDF R&D a été associé aux **actions de R&D** en support à la conception du réacteur ASTRID.

2) Le partenariat avec **Areva / Framatome** était le plus important du projet. Il portait sur :

- **L'ingénierie de l'ilot nucléaire**, comprenant la chaudière nucléaire, les auxiliaires nucléaires, les systèmes électriques associés, le contrôle commande ainsi que l'architecture et l'aménagement des bâtiments ;
- Les **études de conception de cœur et des assemblages** en soutien aux études de conception du CEA.

3) **Ariane Group** a apporté, en tant que spécialiste des lanceurs d'engin, ses **connaissances sur la fiabilité en fonctionnement** des équipements relevant de la sûreté et la disponibilité globale du réacteur (contrôle commandes, systèmes redondants, réparabilité, etc.). L'implication de cet acteur a permis à Ariane Group **d'élargir ses activités au nucléaire civil** (que ce soit la construction de réacteurs, le démantèlement de centrales ou bien la gestion des déchets), en démontrant qu'ils maîtrisaient leur cœur de métier dans un nouveau secteur. **4 grandes étapes** sont à noter dans ce partenariat :

- Ariane Group fut initialement contactée par le CEA au début du programme pour son **expertise sur les matériaux résistants à la rentrée atmosphérique**, afin de participer à la conception du récupérateur de corium (afin de pouvoir gérer au mieux les situations accidentelles) ;
- Bien que cette collaboration spécifique n'ait pas abouti, le CEA choisit de s'engager avec Ariane Group en 2012 dans un modèle de partenariat sur des **sujets de fiabilité et disponibilité** ;
- En 2015, la collaboration s'est poursuivie lors d'une **mission d'expertise sur l'ingénierie système**, puis sur **l'opérabilité** entre 2016 et 2019 ;
- En parallèle, à partir de 2016, l'entreprise a eu en charge la **conception de l'esquisse de l'installation de reconditionnement des déchets nucléaires produits par le futur réacteur ASTRID** (conception de l'architecture industrielle, cadre de traitement des déchets au sein de l'installation, coquille entourant la structure de traitement des déchets, etc.).

4) Le partenariat avec **Alstom / General Electric** portait sur les **études du système de conversion d'énergie** pour ASTRID (en particulier concernant les turbines à vapeur et à gaz pour la production électrique). Ce partenariat a produit des **résultats techniques très satisfaisants** pour les deux partenaires, en raison des 3 facteurs suivants :

- La capacité d'Alstom à **déterminer les solutions techniques déjà existantes** et à d'assister le CEA pour évaluer la **pertinence des nouvelles solutions** développées au cours du programme ;
- La possibilité pour Alstom France, une fois le développement d'un tertiaire en gaz acté, d'aller **chercher des compétences à l'international** – et notamment en Suisse (en France, il existait uniquement des compétences sur les turbines à vapeur) ;
- La souplesse de cette entreprise pour **sortir de son cœur de cible commercial** et **acquérir des compétences innovantes** en termes d'étude et de conception.

5) Le partenariat avec **Bouygues** portait sur la **conception** :

- Du **génie civil de l'ensemble des bâtiments de l'îlot nucléaire** (dont le bâtiment réacteur, les bâtiments auxiliaires nucléaires, les bâtiments de manutention du combustible) ;
- De la **salle des machines** abritant le **groupe turbo-alternateur**.

Ce partenariat a permis à Bouygues de **renforcer sa capacité à être un acteur de la filière nucléaire** en France et à l'étranger.

6) La **CNIM** a travaillé en **complément de Framatome** sur différents sujets liés à la **fabricabilité** (construction mécanique, fabrication des grandes composantes d'ASTRID, usinage, plots parasismiques, etc.). Ces problématiques portaient en particulier sur le développement de dispositions visant à **augmenter le rendement d'un système de conversion d'énergie gaz** et sur la **conception des échangeurs** du système de conversion d'énergie gaz. L'entreprise a ainsi pu développer des **compétences spécifiques mobilisables** dans d'autres secteurs tout en **renforçant son expertise** dans le nucléaire.

7) **COMEX / ONET Technologies** a été mobilisé sur les problématiques liées à la **robotique dans les milieux sodium**. Dans le détail, cet acteur a pu apporter ses compétences en **conception mécanique** pour l'étude des différents systèmes, comme la **robotique** pour l'inspection en service du circuit primaire ou la **conception diversifiée des mécanismes** de commande des barres.

8) Le partenariat avec **ALCEN / SEIV** portait principalement sur les **études de conception de la cellule d'examen des objets irradiés**, c'est-à-dire les cellules blindées servant à faire des examens au plus près des réacteurs. Cet acteur a également été mobilisé sur le **développement d'outillage et de mécanique à haute valeur ajoutée** (par exemple pour des bancs manipulables d'examen sécurisés par rapport aux radiations des échantillons analysés). Ce partenaire était un nouvel entrant dans le domaine de la **sûreté nucléaire**, et a donc pu rapidement progresser sur un certain nombre de compétences grâce à ASTRID.

9) **NOX** est intervenu de manière complémentaire à Framatome sur l'**ingénierie des infrastructures et des moyens communs du site** (les murs autour du réacteur, les clôtures, les arrivées d'eau et d'électricité, les bâtiments connexes à l'exploitation du réacteur, etc.) Le véritable défi de l'entreprise était lié à la complexité du projet, et notamment au **développement de nouveaux codes de calcul** afin d'optimiser la longueur des galeries du démonstrateur. Il s'agissait d'un nouvel entrant dans le secteur nucléaire français, qui a malheureusement fait faillite en 2019.

10) **Technetics** est un acteur de la filière nucléaire française qui, dans le cadre de ce partenariat, a travaillé sur la **conception d'éléments d'étanchéité des systèmes**, et notamment sur le **développement de joints spécifiques** pour le sodium. Son implication portait principalement sur **deux problématiques de niche** :

- **L'étanchéité de bouchons tournants** ;
- **L'étanchéité des systèmes robotisés** inspectant les parois de la cuve.

Il s'agit d'un **spécialiste de l'étanchéité haute performance** dans le nucléaire – sujet assez critique portant sur l'ensemble du cycle du combustible. Cet acteur dispose de **liens étroits avec le CEA** (accord de collaboration technologique antérieur à ASTRID, via un laboratoire commun), lui ayant permis d'acquérir très rapidement une **vision du programme** et de **proposer des solutions techniques pertinentes**.

11) Le partenariat avec **Velan** portait sur une niche technologique, à savoir le prototype de vannes en milieu sodium de grand diamètre. En tant qu'acteur reconnu dans le monde du nucléaire, le partenaire était la référence naturelle pour cette problématique.

12) **Rolls Royce** a également travaillé sur une **niche**, à savoir les **échangeurs sodium-gaz** et la **manutention des assemblages** – en complémentarité des études de GE. C'est finalement la solution de ce dernier acteur qui a été retenu, mettant **fin à ce partenariat en 2015**.

B. L'action ASTRID a également su nouer des partenariats internationaux d'ampleur, fait rare dans la filière nucléaire

Les deux partenaires industriels en dehors de l'Union Européenne du programme ASTRID concernent principalement deux acteurs japonais, à savoir **MHI et MFBR** (Japan Atomic Energy Agency) et **Toshiba**.

A partir de 2014, JAEA, MHI et MFBR sont devenus partenaires du programme sur des sujets de conception et de R&D. 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). Dans le détail, par suite d'une **prise de contact initiée par JAEA**, des négociations ont abouti à une collaboration très large entre le CEA et la filière nucléaire japonaise. Elle s'est traduite par un accord entre 5 parties prenantes qui a pris acte entre 2014 et 2019 (avec une prolongation de 5 années en 2019) : le **CEA, JAEA, Framatome, Mitsubishi Heavy Industries**, et sa filiale **Mitsubishi FBR Systems** travaillant sur les RNR. Le rationnel de cette collaboration pour le Japon était, dans un contexte d'arrêt du fonctionnement opérationnel de leur programme national sur les RNR, de saisir l'opportunité de ces études françaises sur des sujets similaires afin de pouvoir **maintenir leurs compétences**.

Cet accord a permis au CEA d'avoir accès à des **connaissances, financements, personnels de R&D et moyens d'essais au Japon**, avec notamment :

- **10 actions de design** ;
- Une **trentaine de sujets de collaboration de R&D** avec des partenaires japonais ;
- Un **total autofinancement** des travaux portés, avec un support du Japon au programme ASTRID de l'ordre de 50 personnes et de plusieurs dizaines de millions d'euros par an ;
- L'apport de **nombreuses expertises spécifiques à l'industrie nucléaire japonaise** (avancées / visions technologiques développées sur place, problématiques de sismicité, intégration de certains systèmes comme les bars de commande, etc.), permettant une **remise en question pertinente** de certains choix technologiques initiaux du programme ;
- Des **compétences de tout premier plan sur la physique des accidents graves** ;
- Une volonté de participation du **METI** ("Ministry of Economy, Trade and Industry") au financement du projet ASTRID dans sa globalité.

Le CEA a également noué un partenariat spécifique avec un autre partenaire industriel japonais : **Toshiba**. Cette collaboration portait sur un périmètre très borné, à savoir le développement et la qualification de **grosses pompes électromagnétiques** pour les circuits secondaires de sodium.

C. ASTRID a mobilisé des partenariats de recherche significatifs

Un certain nombre de partenaires académiques ont été mobilisés par le CEA sur des sujets de R&D au cours du programme. L'identification de ces différents acteurs s'est faite de manière similaire à celle des partenaires industrielles, à savoir par une **revue successive des lacunes des acteurs du programme en termes de compétences**.

Dans le cadre du programme, cette collaboration avec des acteurs de R&D s'est déclinée en 3 volets :

- Un réseau de **coopérations bilatérales** avec un certain nombre d'acteurs, appelé **ARDECo** (ASTRID R&D European Cooperation). Les acteurs concernés sont : PSI en Suisse, KIT et HZDR en Allemagne, ENEA en Italie et IPUL en Lettonie (avec des accords en cours de discussion pour JRC Karlsruhe en Allemagne et NNL en Angleterre – dans le cadre de la poursuite des efforts de R&D sur les RNR-Na) ;
- Des **contrats de collaboration de R&D** avec les **laboratoires de différentes universités**, principalement situées en France – via des financements directs venant du CEA ;
- La **réponse à des appels à projet de l'Union Européenne** avec d'autres partenaires, sur des thématiques liées à ASTRID.

Figure 19 : Répartition des contrats de collaboration de R&D entre le CEA et des universités françaises [2010-2019]

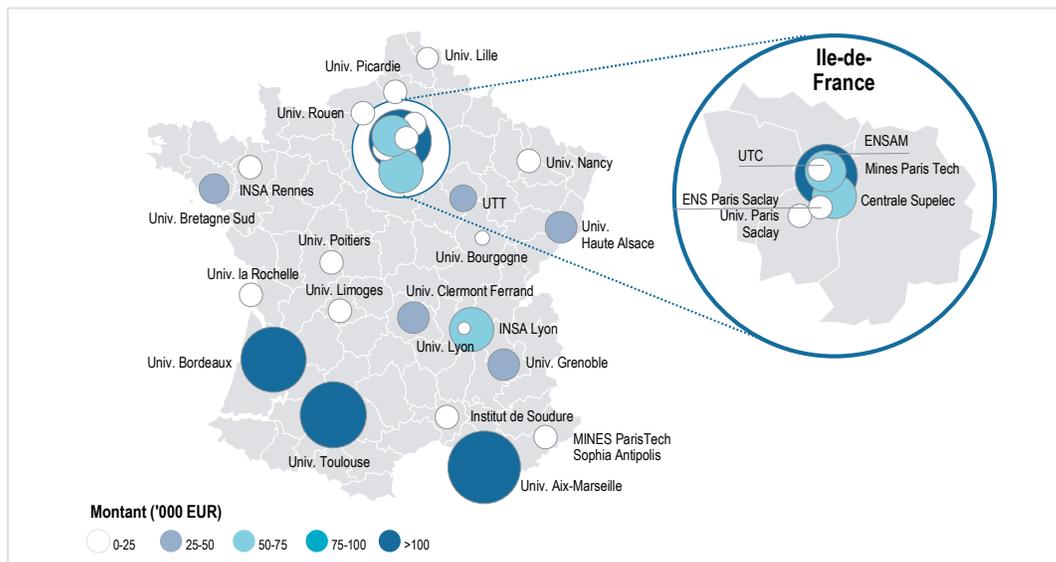
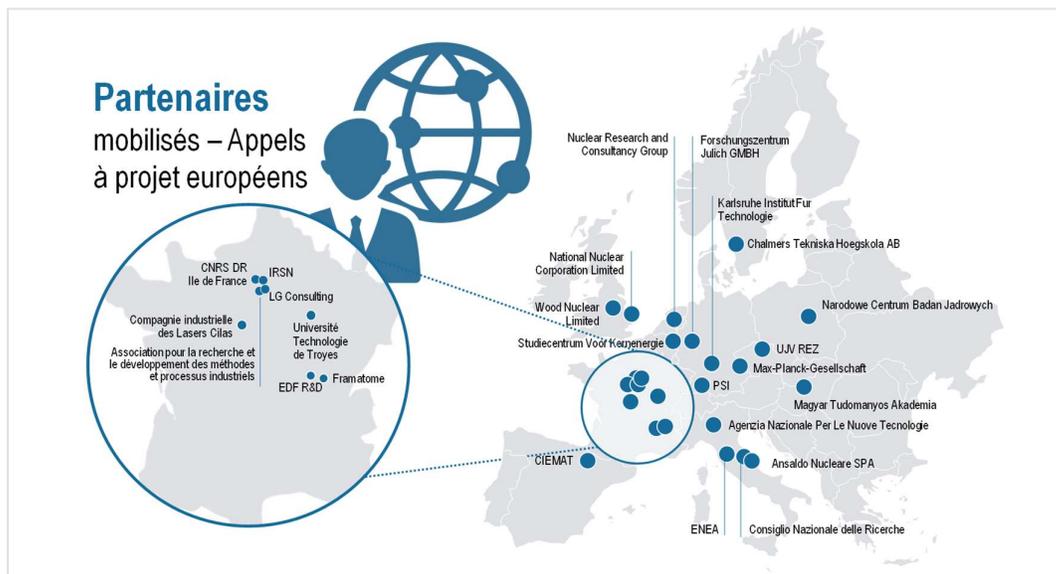


Figure 20 : Répartition des partenaires mobilisés dans le cadre des appels à projet européens [2010-2019]



2.3 ~600 m EUR de flux financiers dépensés dans le cadre du PIA (avec une forte orientation vers la France), qui ont eu un effet sur une large typologie d'acteurs et de territoires

Ces analyses portent sur ~452 m EUR du total des 586 m EUR HT dépensé par le CEA (HT excepté le taux de TVA de ~4% auquel est assujéti cet organisme) dans le cadre des financements du PIA. Parmi les 134 m EUR complémentaires, environ 20 m EUR concernent les salaires des thésards mobilisés au cours du programme. De plus, la cellule en charge du suivi du programme ASTRID dispose d'un niveau de suivi plus hétérogène de ~115 m EUR du total des flux financiers, qui se décomposent de la manière suivante :

- Une partie des commandes payées en 2019 (données encore en cours de consolidation à date de rédaction du rapport) – pour un total de ~25 m EUR ;
- Commandes passées par des directions du CEA autres que le Direction de l'Energie Nucléaire et qui n'ont pas été consolidées via des indicateurs spécifiques – pour un total de ~50 m EUR ;
- Dépenses de logistique (eau, électricité, organisation de congrès, ...) qui ne peuvent pas être isolées de manière spécifique – pour un total de ~40 m EUR.

2.3.1 ASTRID a concentré ses efforts dans la structuration d'une filière française cohérente, avec des bénéfiques pour de nombreux territoires

Concernant la répartition par pays des différents flux financiers du programme, c'est en France que se concentrent la quasi-totalité des dépenses, après près de 94,8% du total. Suivent ensuite le Japon avec 1,7% des dépenses (reflétant les forts liens tissés avec ce pays lors du programme ASTRID), puis l'Allemagne et la Russie avec 0,8% des dépenses pour chacune, la Grande-Bretagne avec 0,5%, et enfin les Etats-Unis et l'Italie avec 0,3%.

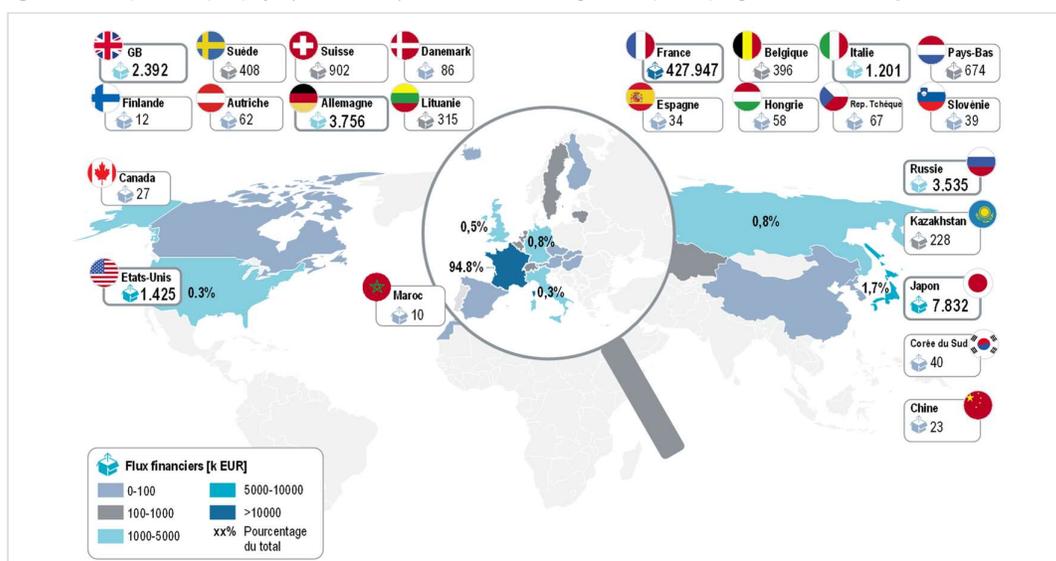
Les 0,8% restants se répartissent entre 24 pays, à savoir principalement : Suisse, Pays-Bas, Suède, Belgique, Lituanie, Kazakhstan, Danemark, Rép. Tchèque, Autriche, Corée du Sud, Slovénie, Hongrie, Espagne, Canada, Chine, Finlande, Maroc.

Cette polarisation des dépenses sur la France traduit à la fois l'autonomie forte de la filière nucléaire française, mais aussi un choix assumé de la part du CEA de développement des compétences d'acteurs français, qui grâce à ce programme ont pu être intégrés à la filière nucléaire.

A l'international, le passage à la prochaine étape d'ASTRID ont été mobilisées :

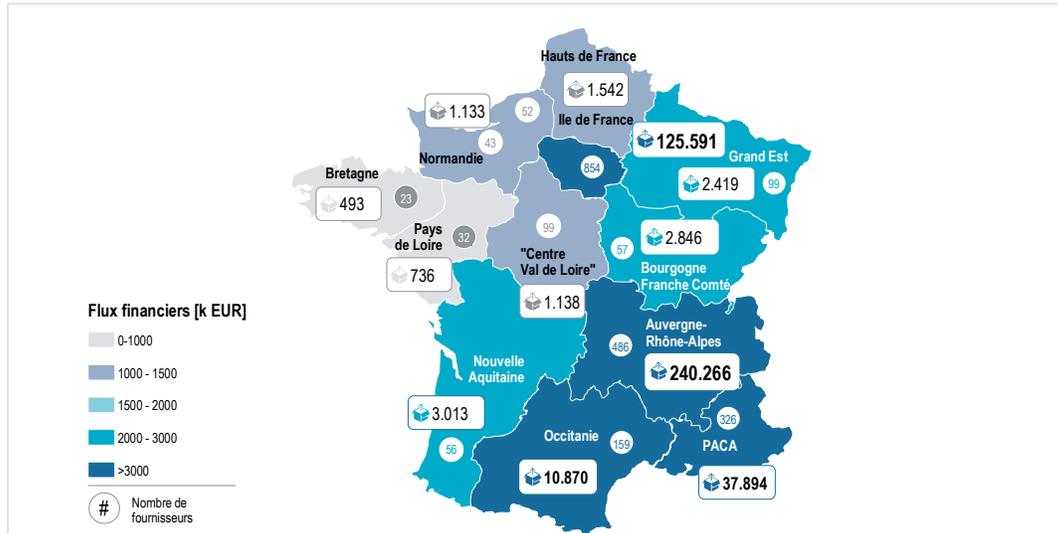
- De l'expertise sur des **sujets liés au nucléaire** au **Japon** et en **Russie**, ainsi que des **moyens d'essais spécifiques** lorsque ces derniers sont disponibles et réactifs rapidement ;
- Des **connaissances et compétences plus ciblées** dans les autres pays, ainsi que de **l'équipement de pointe** (notamment concernant le **matériel de laboratoire**).

Figure 21 : Répartition par pays (> 10 k EUR) des flux financiers générés par le programme ASTRID [m EUR, 2010-2019]



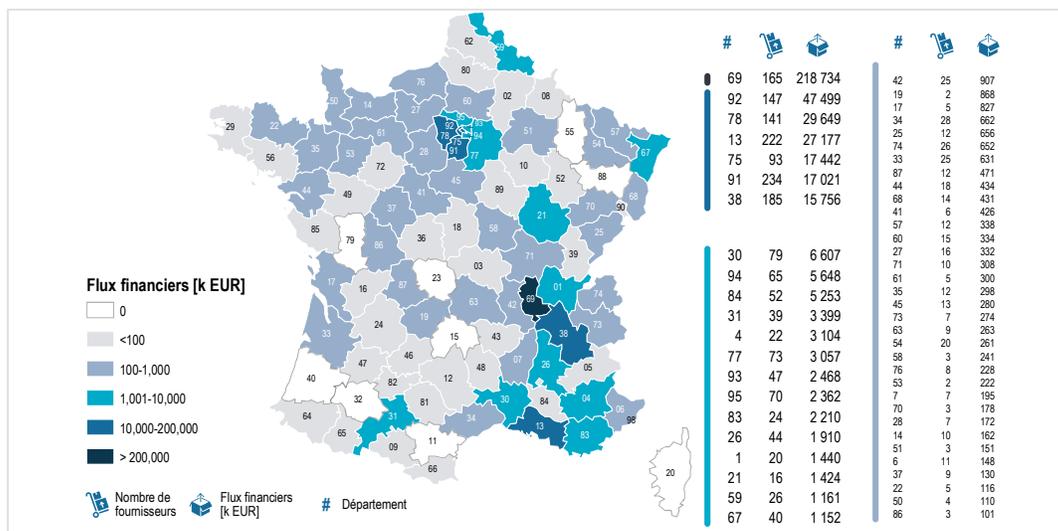
En France, si les impacts d'ASTRID ont concerné l'ensemble du territoire, néanmoins **3 régions** concentrent **95% des flux financiers** : **Auvergne-Rhône-Alpes (56,1% du total)**, **Ile-de-France (29,3% du total)** et **Provence-Alpes-Côte d'Azur (8,9%)**. Les autres régions se partagent les **5% restants**, avec la **répartition suivante** : **2,5%** pour l'Occitanie, **0,7%** pour la Nouvelle-Aquitaine ainsi que pour la Bourgogne-Franche-Comté, **0,6%** pour le Grand Est, **0,4%** pour les Hauts-de-France, **0,3%** pour la Normandie ainsi que pour le Centre-Val-de-Loire, **0,2%** pour les Pays-de-Loire et **0,1%** pour la Bretagne.

Figure 22 : Répartition par région des flux financiers générés par le programme ASTRID [m EUR, 2010-2019]



Plus précisément, ce sont **7 départements (69, 92, 78, 13, 75, 91 et 38)** qui concentrent **87% des dépenses** réalisées en France. Ainsi, les entreprises présentes dans le département **69** ont reçu **219 m EUR** de commandes au cours du programme, puis suivent les départements **92** avec **47 m EUR**, **78** avec **30 m EUR**, **13** avec **27 m EUR**, **75** et **91** avec **17 m EUR** et enfin **38** avec **16 m EUR**. Les **88 départements** restant se partagent les **13% de flux financiers** additionnels du programme. On notera en particulier que ces financements ont été répartis de manière diffuse sur l'ensemble du territoire, seuls **9 départements (11, 15, 20, 23, 32, 40, 55, 79 et 88)** n'ayant bénéficié d'aucun flux financier du programme.

Figure 23 : Répartition par département des flux financiers générés par le programme ASTRID [m EUR, 2010-2019]



Les figures 24 et 25, qui positionnent l'ensemble des entreprises françaises mobilisées dans le cadre du programme, illustrent en particulier la très grande diversité géographique des territoires mobilisés pendant le programme – en dépit

d'une **concentration sur certains pôles**, reflétant la **carte industrielle du nucléaire français**. Ainsi, un très grand nombre de **zones géographiques furent mobilisés**, via notamment :

- L'utilisation de **nombreux sous-traitants locaux** par les différents partenaires ;
- Le recours par le CEA à des **expertises spécifiques** (en termes de compétences et / ou de matériel) **disséminées sur l'ensemble du territoire**.

Figure 24 : Positionnement géographique de l'ensemble des partenaires et sous-traitants français du programme [2010-2019]

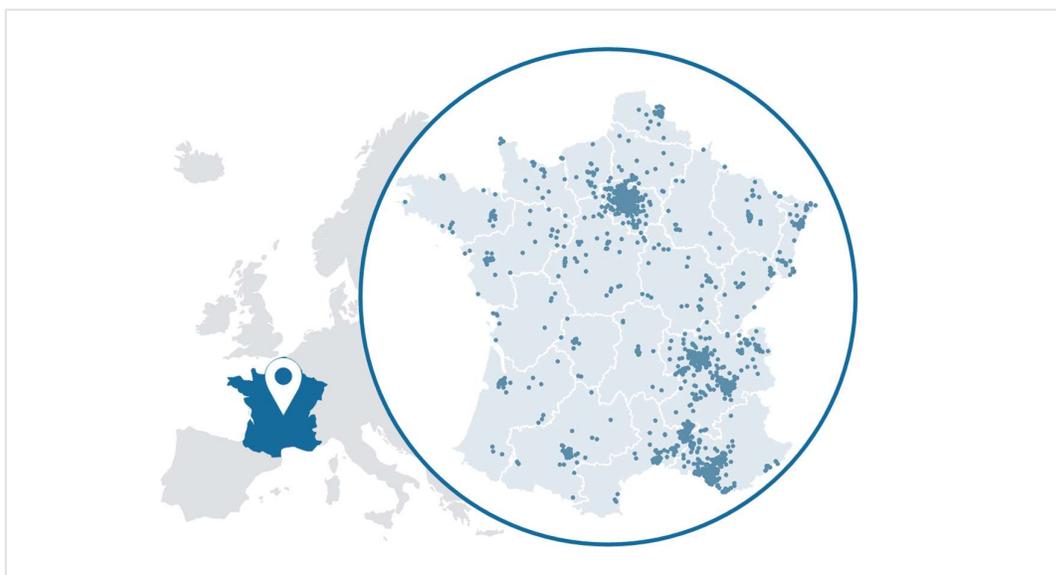


Figure 25 : Positionnement géographique (pondéré par le montant de dépenses) de l'ensemble des partenaires et sous-traitants français du programme [2010-2019]

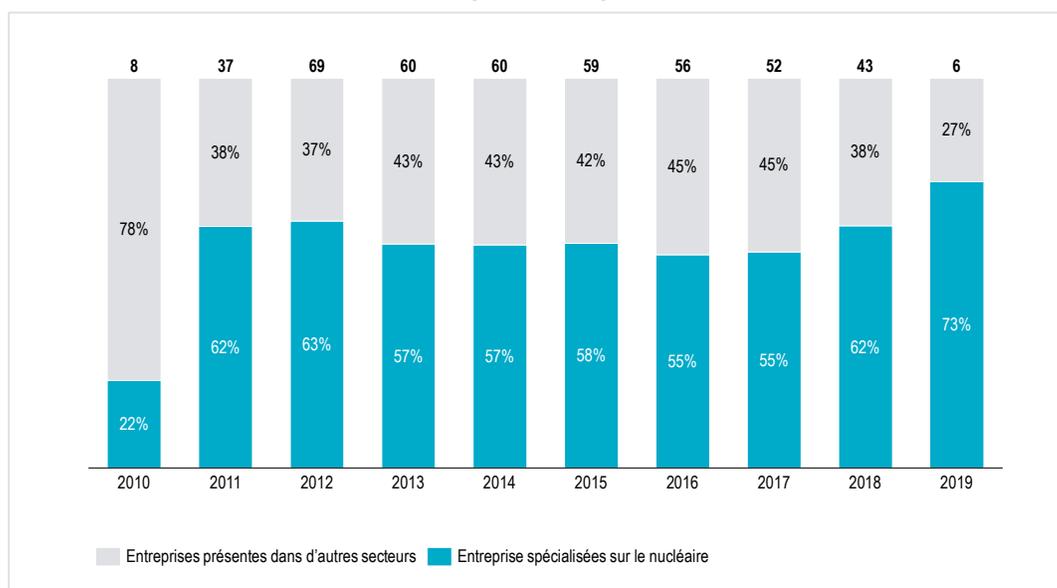
[Confidentiel]

2.3.2 ASTRID a bénéficié à hauteur de ~50 / 60% à des acteurs de la filière nucléaire, permettant de développer celle-ci

La part des dépenses dédiées aux entreprises spécialisées dans le nucléaire est restée **relativement stable** pendant la durée du programme (de l'ordre de **50 à 60%**), avec une variation allant de **22%** en **2010** (année de début du programme marqué par une plus forte hétérogénéité des dépenses) à **73%** en **2019**. Au-delà **d'effets liés au démarrage du programme**, **3 temps s'observent** pendant ASTRID :

- Une **relative concentration des dépenses dans le nucléaire** en 2011 / 2012 afin d'avancer rapidement sur les problématiques liées à la conception du réacteur ;
- Un **élargissement de 2013 à 2017** afin d'intégrer les autres dimensions techniques nécessaires à la conception du prototype – en lien avec l'établissement de partenariats très variés ;
- La **fin de ces partenariats en 2018 / 2019**, avec un **recentrage des dépenses sur le nucléaire** afin de gérer les problématiques liées à la conception rapide d'un réacteur de dimensionnement plus réduit.

Figure 26 : Part des dépenses dédiées à des entreprises spécialisées dans le nucléaire au cours du programme [% , 2010-2019]

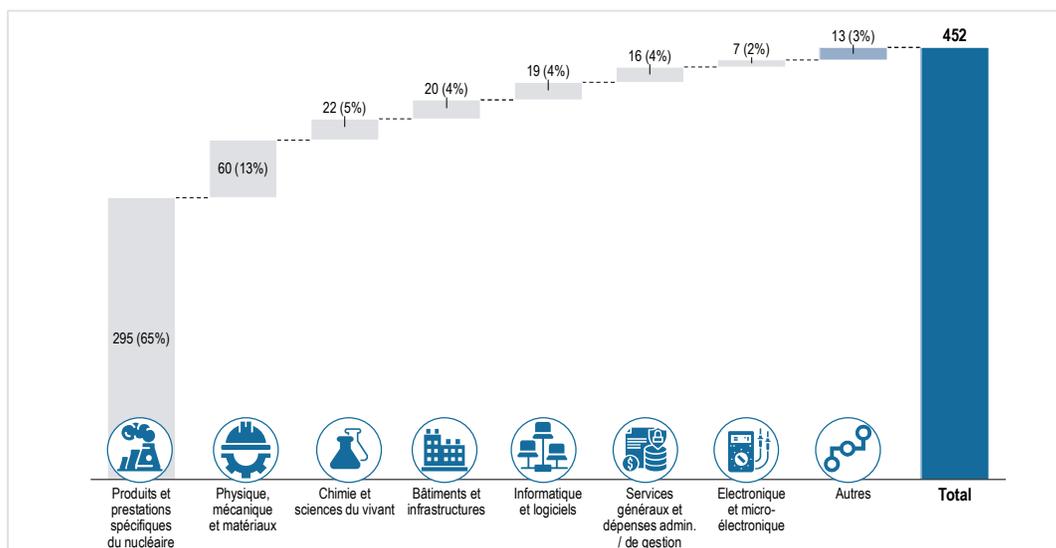


En termes de répartition des flux financiers par secteur d'activité, **35% des dépenses du programme** ont été à destination d'autres secteurs que le nucléaire, ce qui traduit le fait que le programme a eu des effets économiques sur de **nombreux pans de l'économie française au-delà des grands acteurs du nucléaire**. Dans le détail, les principales catégories hors produits et prestations spécifiques du nucléaire sont :

- **Physique, mécanique et matériaux** – avec **60 m EUR**, soit **13%** du total ;
- **Chimie et sciences du vivant** – avec **22 m EUR**, soit **5%** du total ;
- **Bâtiments et infrastructures** – avec **20 m EUR**, soit **4%** du total ;
- **Informatique et logiciels** – avec **19 m EUR**, soit **4%** du total ;
- **Services généraux et dépenses administratives / de gestion** – avec **16 m EUR**, soit **4%** du total ;
- **Electronique et micro-électronique** – avec **7 m EUR**, soit **2%** du total.

La catégorie **Autres** regroupe principalement les dépenses suivantes : **Optique (6 m EUR)**, **Fournitures industrielles et consommables (4 m EUR)**, **Voie, réseau et équipements de site (1 m EUR)**, et **Besoins techniques et logistiques (1 m EUR)** – environ **0,7 m EUR** de dépenses n'étant pas catégorisées (soit **0,2%** du total).

Figure 27 : Répartition sectorielle des dépenses d'ASTRID [m EUR, 2010-2019]

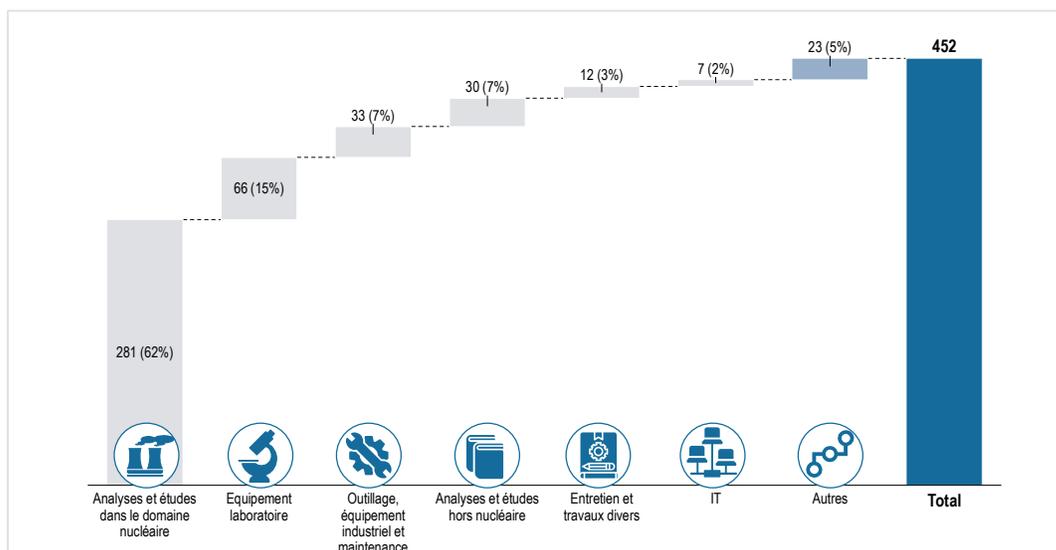


2.3.3 Un tiers des dépenses portent sur des postes diversifiés, qui vont au-delà des études dans le domaine nucléaire

Par nature de dépenses, ce sont les analyses et études dans le domaine nucléaire qui absorbent la plus grande partie des financements d'ASTRID, avec **281 m EUR** (soit **62% du total**). De plus, on constate la décomposition suivante des **38% additionnels** :

- **Equipeement laboratoire** (Instruments et matériel nécessaires aux analyses et études en laboratoire) – **66 m EUR**, soit **15%** du total ;
- **Outillage, équipement industriel et maintenance** (Equipeement nécessaire à l'ingénierie du démonstrateur et des autres installations et projets du programme) – **33 m EUR**, soit **7%** du total ;
- **Analyses et études hors nucléaire** (Essais, tests et analyses non spécifiques au nucléaire) – **30 m EUR**, soit **7%** du total ;
- **Entretien et travaux divers** (Entretien des locaux et espaces verts, travaux de bâtiments) – **12 m EUR**, soit **3%** du total ;
- **IT** (Logiciels et serveurs scientifiques ou bureautiques) – **7 m EUR**, soit **2%** du total ;
- **Autres types de dépenses** (Matières premières, logistiques, audit, ...) – **23 m EUR**, soit **5%** du total.

Figure 28 : Répartition par nature des dépenses du programme [m EUR, 2010-2019]



2.3.4 De nombreux partenaires et acteurs mobilisés, avec 30% des financements orientés vers les ETI, PME et TPE

[Confidentiel]

Figure 29 : Répartition par prestataire des flux financiers d'ASTRID [m EUR, 2010-2019]

[Confidentiel]

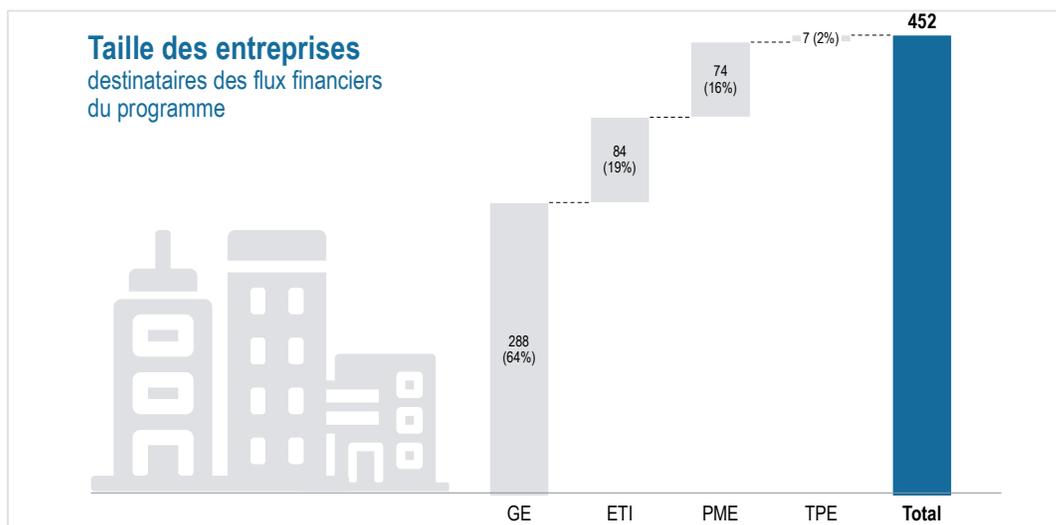
Pour répartir les entreprises en fonction de leur taille, la **classification employée depuis 2008 par l'INSEE** (décret n° 1354) a été utilisée, à savoir :

- TPE ("Très Petite Entreprise") : Moins de **10 employés** ;
- PME ("Petites et moyennes entreprises") : Entre **10 et 249 employés** ;
- ETI ("Entreprises de Taille Intermédiaire") : Entre **249 et 4.999 employés** ;
- GE ("Grandes Entreprises") : Plus de **5.000 employés**.

Il est à noter que cette classification a été effectuée au prorata des entreprises communiquant des informations sur leurs effectifs, soit environ **92% du total** des flux financiers analysés.

On constate que **près de 36% des financements** du programme ont été à destination des **ETI (18%), PME (16%) et TPE (2%)**, ce qui traduit la grande variété des sous-traitants du programme.

Figure 30 : Ventilation par taille d'entreprise des dépenses du programme [m EUR, 2010-2019]

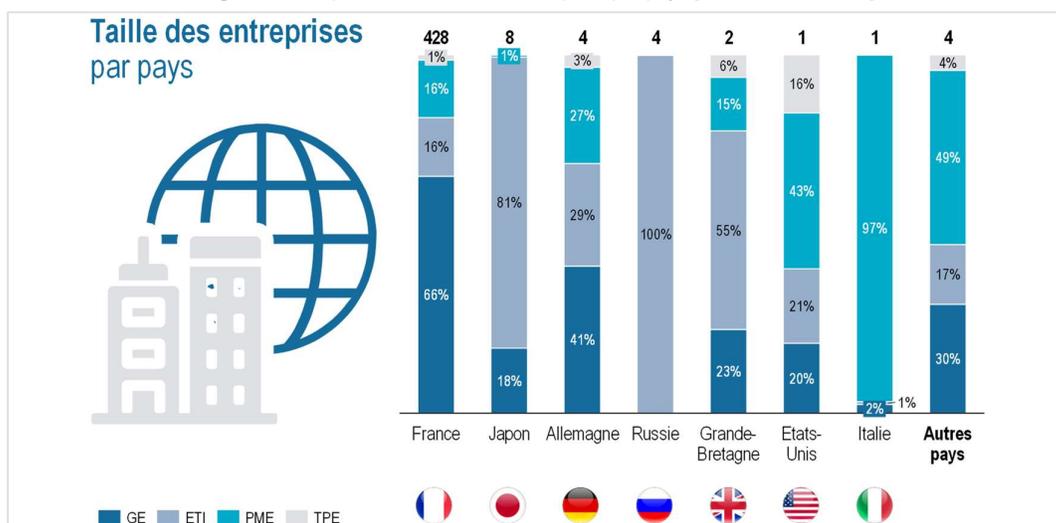


2.3.5 Un examen croisé des différents types de structurations des flux financiers permet d'offrir un éclairage plus poussé de certains indicateurs

A. Une analyse géographique de la taille des entreprises fait apparaître des particularismes géographiques importants

On observe de **fortes disparités** à travers le croisement des **données de dépenses par pays** et celles sur les **tailles d'entreprises**. Si en **France** les flux financiers sont majoritairement à destination des **GE (66%)**, les **ETI / PME / TPE** représentent toutefois une part beaucoup plus importante à **l'international : 82% au Japon ; 59% en Allemagne ; 100% en Russie ; 77% au Royaume-Uni ; 80% aux Etats-Unis ; 98% en Italie ; 70% dans les autres pays** (les ETI en question étant des laboratoires de recherche nationaux en Russie et au Japon).

Figure 31 : Répartition des tailles d'entreprise par pays [m EUR, 2010-2019]



[Confidentiel]

Figure 32 : Zoom sur les principaux prestataires d'Astrid par pays [m EUR, 2010-2019]

[Confidentiel]

[Confidentiel]

Figure 33 : Répartition des tailles d'entreprises par région [m EUR, 2010-2019]

[Confidentiel]

[Confidentiel]

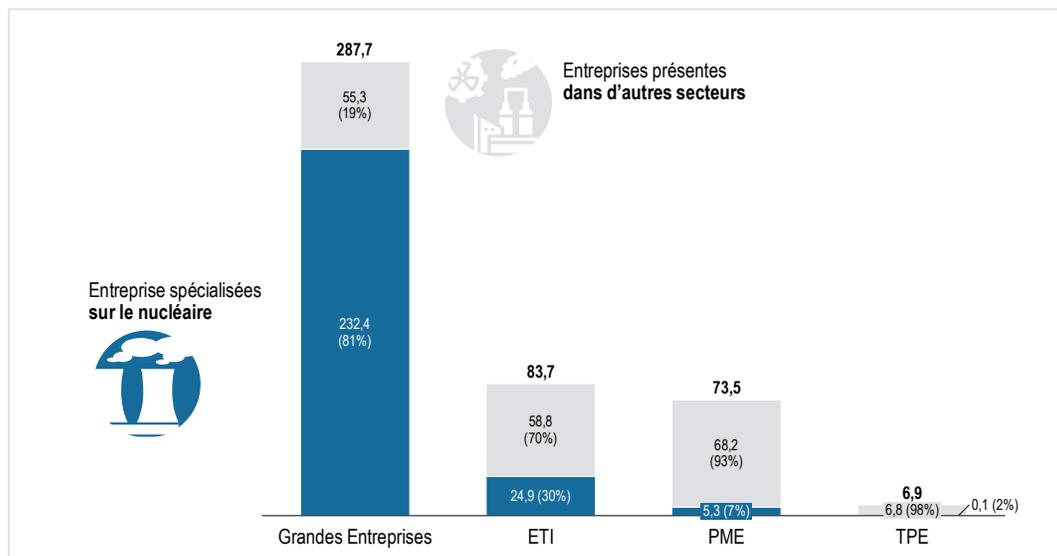
Figure 34 : Répartition des principaux prestataires du programme par région [m EUR, 2010-2019]

[Confidentiel]

B. Des dynamiques de spécialisation différenciées s'observent en fonction de la taille des entreprises

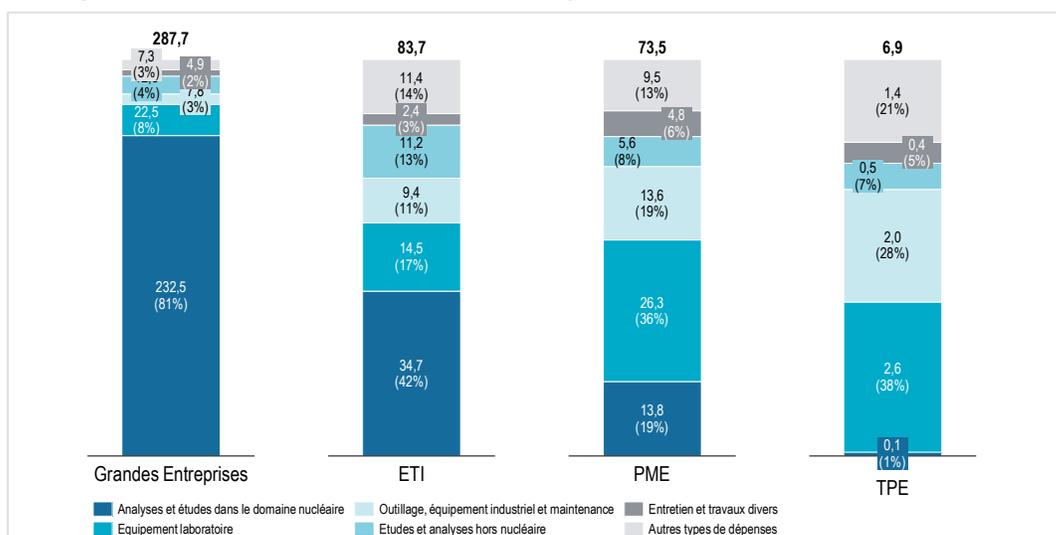
En analysant la taille et la répartition sectorielle des entreprises destinataires des dépenses, on constate que les acteurs marqués par une **spécialisation dans le nucléaire** sont majoritairement des **GE**, tandis que les **TPE**, **PME** et **ETI** ont leurs activités **davantage réparties dans d'autres secteurs**.

Figure 35 : Niveau de spécialisation sur le nucléaire par taille d'entreprise [m EUR, 2010-2019]



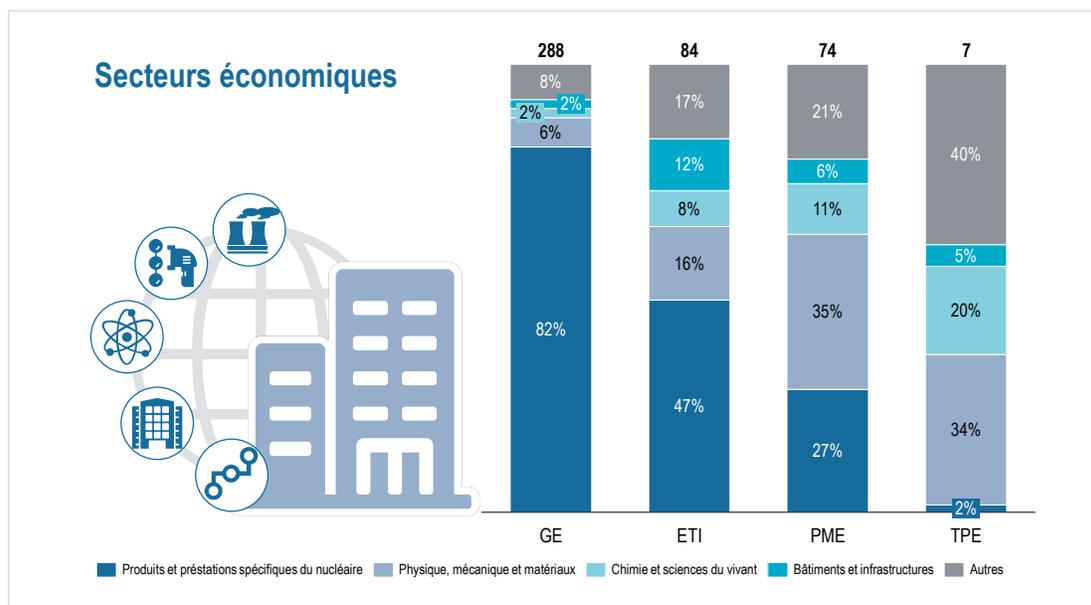
En **croisant** maintenant la **répartition** en fonction de la **typologie de dépense** et de la **taille des différentes entreprises** mobilisées dans le cadre du programme, l'effet est encore plus net. Ainsi, ce sont les PME et les TPE qui présentent la plus **grande diversité en termes de types de dépenses** effectuées dans le cadre des financements du PIA.

Figure 36 : Répartition de la nature des dépenses du programme par taille d'entreprise [m EUR, 2010-2019]



Ceci reflète l'**impact important des ETI, PME et TPE sur un large champ de secteurs économiques**. Ainsi, comme illustré en figure 37, les GE ont fourni en grande majorité (**82%**) des prestations pouvant être **cataloguées sectoriellement** comme des **produits et prestations spécifiques du nucléaire** – à l'inverse, les plus petits acteurs ont été mobilisés dans de **nombreux autres secteurs d'activités**.

Figure 37 : Répartition des secteurs d'activité du programme par taille d'entreprise [m EUR, 2010-2019]

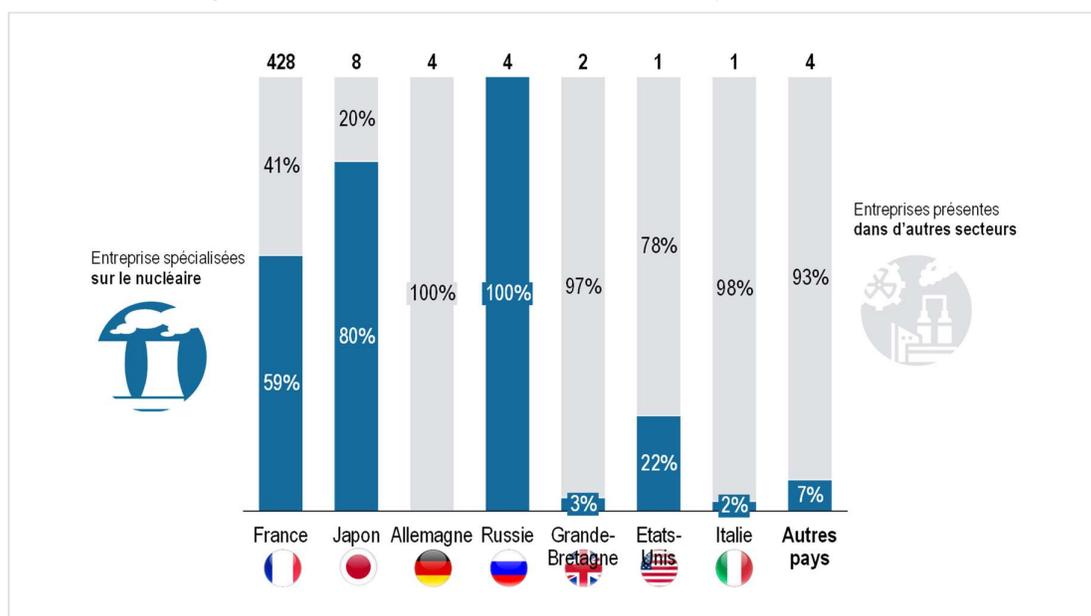


C. ASTRID a su mobiliser des compétences variées en fonction des expertises des différents pays et territoires

Par pays, on observe que la **part des entreprises spécialisées dans le secteur nucléaire varie fortement**. Ainsi, alors qu'en France **~60% des dépenses** sont à destination d'entreprises du secteur nucléaire, à l'international deux groupes peuvent être distingués :

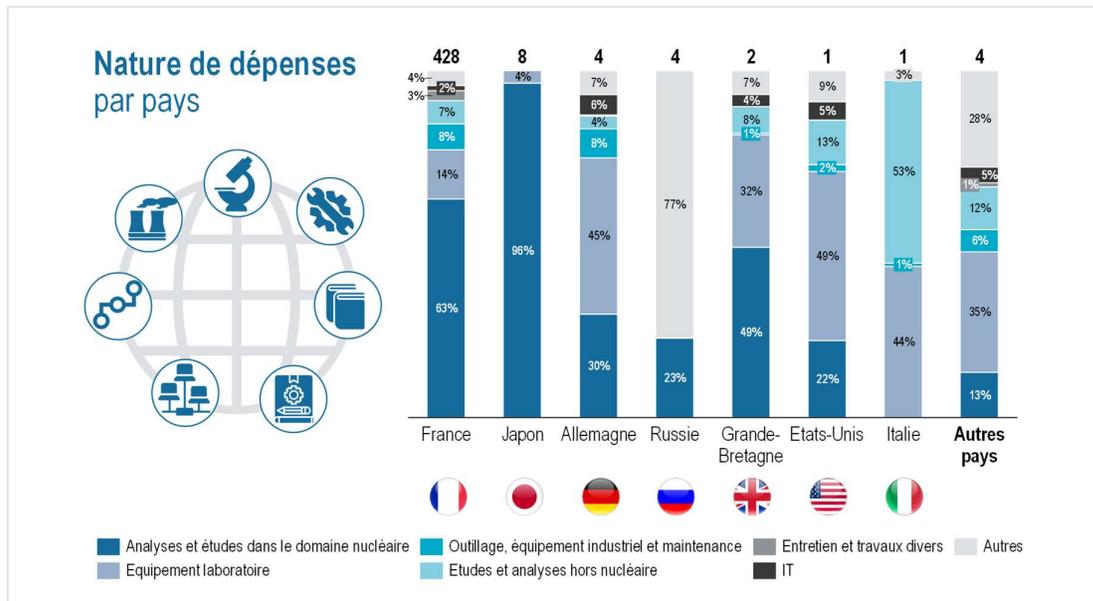
- Les acteurs en **Russie** et au **Japon** se concentrent fortement sur le nucléaire, avec respectivement **100%** et **80%** des flux financiers d'ASTRID ;
- A l'inverse, les dépenses vers **l'Allemagne (0%)**, la **Grande-Bretagne (3%)**, **l'Italie (2%)** et les **autres pays (7%)** ne sont allées que pour une **infime partie** à des **entreprises spécialistes du nucléaire**.

Figure 38 : Niveau de spécialisation sur le nucléaire par pays [m EUR, 2010-2019]



La figure 39 permet d'illustrer qu'en plus de certaines **expertises pointues sur le nucléaire d'acteurs présents dans d'autres pays**, le CEA est principalement allé chercher à l'international des **compétences spécifiques liées à de l'équipement de laboratoire**. Par ailleurs, il est notable que dans plusieurs pays (en **Grande-Bretagne** et en **Allemagne** notamment), ce soient des **acteurs généralistes** qui aient été amenés à effectuer des **analyses et études dans le domaine nucléaire** (cf. **comparaison entre figures 38 et 39**) – ce phénomène concernant en majorité les **partenaires de R&D d'ASTRID**.

Figure 39 : Répartition de la nature des dépenses d'ASTRID par pays [m EUR, 2010-2019]



[Confidentiel]

Figure 40 : Niveau de spécialisation sur le nucléaire par région [m EUR, 2010-2019]

[Confidentiel]

Figure 41 : Répartition de la nature des dépenses du programme par région [m EUR, 2010-2019]

[Confidentiel]

2.4 Les impacts de l'action ASTRID sont diversifiés et vont au-delà du nucléaire

2.4.1 Le schéma de causalité démontre des effets significatifs, à la fois sur la sécurisation de la filière RNR, mais aussi au-delà

Afin de **répertorier les externalités** générées par le programme ASTRID, il convient **d'analyser les impacts clés attendus** en identifiant des indicateurs et variables pertinents. Cette cartographie passe par la **reconstitution des chaînes de causalité des impacts du programme**, qui permettent de **documenter l'ensemble des impacts** liés aux financements déployés. En particulier, dans le cadre de l'évaluation des différentes actions du PIA, une nomenclature avec **8 grandes catégories d'impacts** a été retenue, à savoir (cf. **figure 45**) :

- Croissance** ;
- Créations d'emplois** ;
- Compétitivité et performance** des acteurs économiques ;
- Accélération de l'innovation** ;
- Effets en termes de **capital humain et de savoir** ;

- f. Effets sur l'**environnement** et la **santé** ;
- g. **Structuration des écosystèmes** ;
- h. **Impact territorial**.

Ces différents impacts se déclinent ainsi selon les **diverses causalités du financement du programme ASTRID**, qui elles-mêmes s'articulent selon des **horizons de temporalité différenciés**. Sur le **court terme** (5 à 10 ans), les **financements du PIA** ont généré les impacts suivants :

- En premier lieu, la **mobilisation de financements complémentaires** et **d'expertises** auprès de différents partenaires, qui regroupe le fait que ces acteurs ont mobilisé tout un **ensemble de moyens financiers, technologiques et humains** en complément des dépenses effectuées par le CEA ;
- Ce premier impact, combiné aux subventions du PIA, a généré **trois grandes causalités** :
 - Des **études de conception du démonstrateur ASTRID**, qui désigne l'ensemble des études menées afin de **concevoir un démonstrateur de RNR-Na** ;
 - Des **actions de R&D et d'innovation**, qui qualifie le travail des **diverses équipes** mobilisées sur des **sujets de R&D** au cours du programme ;
 - La **mobilisation d'un écosystème** de grands groupes et de plus petites entreprises, qui caractérise le fait que le programme ait permis de **structurer tout un ensemble d'entreprises sur les problématiques de la filière nucléaire**, mais aussi de renforcer leurs **synergies de coûts** via une collaboration plus poussée et une harmonisation de leurs process, outils, méthodes et *meilleures pratiques*.

Sur le **moyen terme** (10 à 15 ans), les causalités suivantes ont été produites :

- D'une part, en lien direct avec les **objectifs** au cœur du programme :
 - L'identification des **enjeux de faisabilité industrielle** des RNR-Na, qui regroupe l'**ensemble des options technologiques qualifiées** pendant le programme permettant la conception du démonstrateur ;
 - Des **avancées sur les process et techniques** liés aux réacteurs à neutrons rapides, qui caractérise les avancées liées aux sous-programmes autres que la conception du démonstrateur ASTRID ;
- D'autre part, en raison de la **grande ampleur d'ASTRID**, de la **diversité de ses enjeux** et des **programmes de R&D associés**, et enfin de la **diversité des partenaires mobilisés** :
 - Le **développement de plateformes et d'installations** en France et à l'international, qui qualifie l'ensemble des causalités liées à la rénovation et au développement d'installations dans le cadre du programme ;
 - La **stimulation** de la **collaboration** entre acteurs du nucléaire (français, inter-étatiques et académiques) et la **structuration de leur écosystème**, qui désigne
 - **L'approfondissement de la structuration** de la filière nucléaire (via notamment des **synergies de revenus** en raison de l'établissement de partenariats commerciaux) ;
 - La création de **liens privilégiés entre Etats** (notamment entre la France et le Japon, mais aussi les Etats-Unis dans une moindre mesure) ainsi **qu'entre le CEA et divers partenaires académiques** ;
 - Le **développement** et la **capitalisation de nouveaux OCS, objectifs de sûreté et méthodes de travail**, qui rassemble l'ensemble des causalités générées dans ces trois domaines par ASTRID pour l'ensemble des acteurs de la filière nucléaire (CEA inclus), ainsi que les usages **relatifs à ces causalités** ;
 - **L'augmentation de la visibilité de la France** et du **CEA** sur les enjeux liés au nucléaire, qui reflète le rôle de premier plan joué par la France sur la problématique des RNR-Na en raison de l'ampleur du déploiement d'ASTRID ;
- Enfin, des **externalités positives plus indirectes** du programme ont pu être engendrées, à savoir :

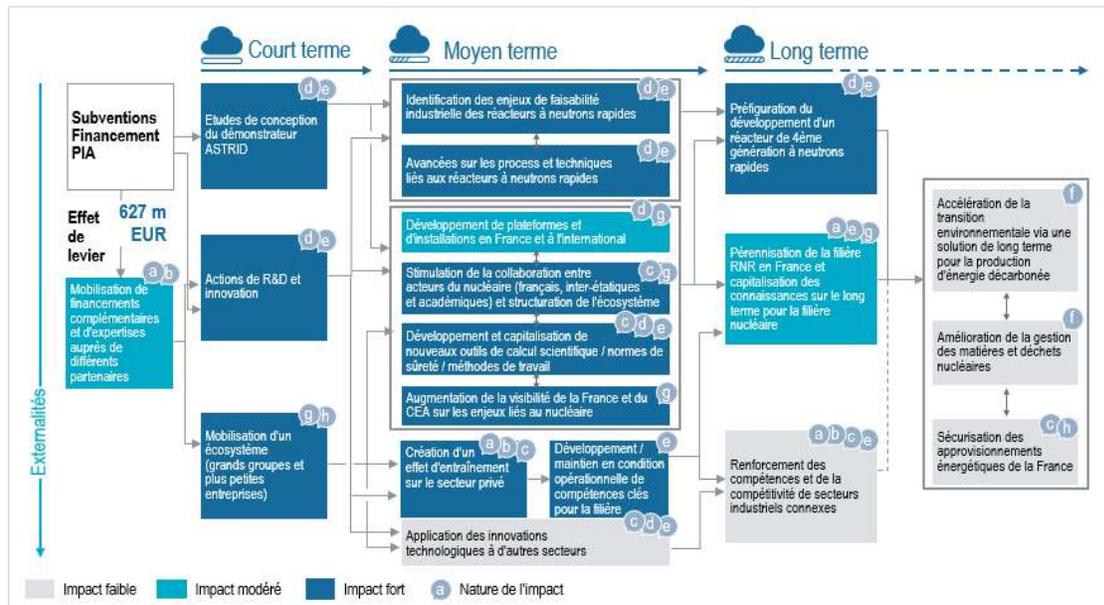
- La **création** d'un effet **d'entraînement sur le secteur privé**, qui regroupe l'ensemble des causalités générées pour les acteurs privés en termes d'augmentation de la compétitivité, de gains en termes d'emploi, d'atteinte d'économies d'échelles, etc. ;
- Le **développement / maintien en condition opérationnelle** de compétences clés pour la filière, qui qualifie le fait qu'ASTRID ait permis de conserver un grand nombre de compétences critiques concernant les RNR-Na ;
- **L'application des innovations technologiques** à d'autres secteurs, qui caractérise l'ensemble des causalités liées aux applications des **innovations** du programme à **d'autres secteurs économiques** que le nucléaire.

Sur le **long terme** (> 15 ans), le schéma des causalités du programme est le suivant :

- Dans un premier temps, la préfiguration du **développement d'un réacteur de 4^{ème} génération** à neutrons rapides, ainsi que la **pérennisation de la filière RNR** en France / la capitalisation des connaissances sur le long terme pour la filière nucléaire – ces causalités regroupant le **potentiel développement d'une filière des RNR-Na** à la suite du programme ASTRID, via la décision de l'Etat français d'accélérer le développement de ce type de réacteur nucléaire à l'échelle industrielle ;
- Ces effets devaient ensuite mener à **l'accélération de la transition environnementale** via une solution de long terme pour la production d'énergie décarbonée, **l'amélioration de la gestion des matières et combustibles usés nucléaires**, et la **sécurisation des approvisionnements énergétiques** de la France – toutes ces causalités étant dépendantes du développement préalable de la technologie RNR-Na à une échelle industrielle ;
- Enfin, dans une logique de continuité des impacts d'ASTRID, les **externalités positives** du programme doivent venir renforcer sur le long terme les **compétences** et la **compétitivité** de **secteurs industriels connexes** – dans la **prolongation de l'ensemble des causalités économiques** générées dans le cadre du programme, ainsi que de **l'application des différentes innovations** du programme à d'autres secteurs économiques que le nucléaire.

Les impacts précités ont été catégorisés en impact **faible**, **modéré** et **fort**, et retranscrits dans la **figure 42** par un code couleur : **gris**, **bleu clair**, **bleu foncé**. La **figure 42** permet de présenter ces impacts de manière synthétique : **lecture en ligne** de la catégorie d'impact (croissance, emplois, compétitivité, ...) et **lecture en colonne** de la temporalité (court terme, moyen terme, long terme).

Figure 42 : Schéma des causalités pour l'évaluation de l'action PIA ASTRID



2.4.2 L'évaluation et le traitement des sous-éléments de ce schéma permet de catégoriser une grande partie des différentes externalités du programme

L'évaluation et le traitement de ces externalités (détaillées dans la troisième partie du rapport) s'est effectuée

- En repartant des **8 grandes catégories d'impact associées au schéma des causalités du programme** ;
- Selon les **retours des entretiens** effectués avec les différents acteurs du programme, et l'**analyse des différentes données** documentant ces externalités potentielles (dans les cas applicables).

Le but de ces analyses était notamment de recouper la **nomenclature relative au degré d'impact de l'évaluation des actions du PIA** (détaillée dans les figures 43 à 46), à savoir :

- **Impact** (Faible / Modéré / Fort) et **rationnel** lié à cet impact ;
- **Echéance de l'impact** à partir du lancement des projets (5 à 10 ans, 10 à 15 ans, plus de 15 ans) ;
- **Focalisation sectorielle** (Spécifique / Transversale / Systémique) ;
- **Diffusion territoriale** (Ciblé sur un territoire / Diffus / National) ;
- **Valeur** (Non mesurable / Mesurable / Mesuré).

Figure 43 : Rationnel de la description des niveaux d'impacts des schémas des causalités [1/2]

Impacts cartographiés	Rationnel du niveau d'impact
Mobilisation de financements complémentaires et d'expertises auprès de différents partenaires	<ul style="list-style-type: none"> > Effet de levier modéré par rapport au benchmark PIA 1 > Capacité à mobiliser de nombreuses expertises chez les partenaires, ainsi que des financements et subventions d'autres acteurs
Etudes de conception du démonstrateur ASTRID	<ul style="list-style-type: none"> > Mise en œuvre du programme et conduite de l'ensemble des travaux nécessaires à ces études de conception > Finalisation des études de conception prévues dans la convention initiale du programme
Actions de R&D et innovation	<ul style="list-style-type: none"> > Nombre de brevets en ligne avec les actions comparables du PIA 1 > Multiples articles scientifiques, thèses, innovations, etc. générés > Effectifs de R&D conséquents ayant participé au programme
Mobilisation d'un écosystème (grands groupes et plus petites entreprises)	<ul style="list-style-type: none"> > Capacité à faire appel à de nombreux acteurs de différentes tailles (GE, ETI, PME, TPE) > Implication de l'ensemble des acteurs clés de la filière
Identification des enjeux de faisabilité industrielle des réacteurs à neutrons rapides	<ul style="list-style-type: none"> > Définition des options technologiques clés du réacteur pour un passage à une large échelle > Précision du design et des enjeux de faisabilité associés > Détermination des coûts de construction à l'échelle industrielle
Avancées sur les process et techniques liés aux réacteurs à neutrons rapides	<ul style="list-style-type: none"> > Nombreuses avancées réalisées sur les process et techniques des RNR-Na (dizaines de brevets, innovations, maquettes, process spécifiques, etc.)
Développement de plateformes et d'installations en France et à l'international	<ul style="list-style-type: none"> > Développement relativement limité des différentes plateformes (plusieurs constructions abandonnées) – ensemble des maquettes et plusieurs rénovations finalisées
Stimulation de la collaboration entre acteurs du nucléaire (français, inter-étatiques et académiques) et structuration de l'écosystème	<ul style="list-style-type: none"> > Forte stimulation de la collaboration et de la structuration des acteurs de la filière, via la construction de multiples partenariats et liens de long terme
Développement et capitalisation de nouveaux outils de calcul scientifique / normes de sûreté / méthodes de travail	<ul style="list-style-type: none"> > Multiples OCS / normes / méthodes développés > Utilisation de ces acquis sur de nouveaux projets par les différents partenaires

Figure 44 : Rationnel de la description des niveaux d'impacts des schémas des causalités [2/2]

Impacts cartographiés	Rationnel du niveau d'impact
Augmentation de la visibilité de la France et du CEA sur les enjeux liés au nucléaire	<ul style="list-style-type: none"> > Rôle de premier plan joué par la France dans différents congrès dédiés au nucléaire > Impulsion donnée à de nombreuses collaborations internationales
Création d'un effet d'entraînement sur le secteur privé	<ul style="list-style-type: none"> > Nombreux effets d'entraînements mesurés ayant permis de stimuler la compétitivité et le développement (commercial, RH, etc.) de l'ensemble des parties prenantes
Développement / maintien en condition opérationnelle de compétences clés pour la filière	<ul style="list-style-type: none"> > Multiples formations réalisées dans le cadre du programme > Rôle clé d'ASTRID dans le développement et le maintien de compétences de la filière
Application des innovations technologiques à d'autres secteurs	<ul style="list-style-type: none"> > Absence d'actions menées de manière systématique en vue de la valorisation des innovations / brevets dans des secteurs extérieurs au nucléaire > Pas de dispositif de rémunération identifié à date visant d'autres industries
Préfiguration du développement d'un réacteur de 4ème génération à neutrons rapides	<ul style="list-style-type: none"> > Nombreuses avancées sur les technologies nucléaires liées aux RNR-Na > Obtention d'un avant-projet sommaire complet et cohérent, permettant de définir les caractéristiques d'ASTRID et d'estimer le budget pour la suite du programme
Pérennisation de la filière RNR en France et capitalisation des connaissances sur le long terme	<ul style="list-style-type: none"> > Dépriorisation de cette technologie par pouvoirs publics, rendant l'avenir de la filière française des RNR-Na relativement précaire > Process de Knowledge Management avancés, laissant envisager une potentielle future capitalisation des connaissances acquises
Renforcement des compétences et de la compétitivité de secteurs industriels connexes	<ul style="list-style-type: none"> > Quelques impacts limités en termes de compétences pour certains partenaires et sous-traitants > Peu d'effets mesurés / reportés en lien avec la compétitivité dans d'autres secteurs
Accélération de la transition environnementale via une solution pour la production d'énergie décarbonée Amélioration de la gestion des matières et déchets nucléaires Sécurisation des approvisionnements énergétiques de la France	<ul style="list-style-type: none"> > Effets potentiellement existants, mais encore très théoriques à date > Impacts relativement faibles, en raison du décalage du projet industriel à la seconde moitié du XXI siècle

Figure 45 : Description des différents éléments des schémas causaux selon la nomenclature d'évaluation du PIA [1/2]

Nomenclature des impacts du PIA	Impacts cartographiés	Nature d'impact					
			Échéance de l'impact	Focalisation sectorielle	Diffusion territoriale	Valeur	Impact
	Mobilisation de financements complémentaires et d'expertises auprès de différents partenaires	a b	5 à 10 ans	Spécifique	Diffus	Mesurable	Modéré
a Croissance	Etudes de conception du démonstrateur ASTRID	d e	5 à 10 ans	Spécifique	Ciblé	Non mesurable	Fort
b Créations d'emplois	Actions de R&D et innovation	d e	5 à 10 ans	Transversal	Diffus	Mesuré	Fort
c Compétitivité et performance des acteurs économiques	Mobilisation d'un écosystème (grands groupes et plus petites entreprises)	g h	5 à 10 ans	Spécifique	Diffus	Non mesurable	Fort
d Accélération de l'innovation	Identification des enjeux de faisabilité industrielle des réacteurs à neutrons rapides	d e	5 à 10 ans	Spécifique	Ciblé	Non mesurable	Fort
e Effets en termes de capital humain et de savoir	Avancées sur les process et techniques liés aux réacteurs à neutrons rapides	d e	5 à 10 ans	Spécifique	National	Mesurable	Fort
f Effets sur l'environnement et la santé	Développement de plateformes et d'installations en France et à l'international	d g	5 à 10 ans	Spécifique	National	Mesurable	Modéré
g Structuration des écosystèmes	Stimulation de la collaboration entre acteurs du nucléaire (français, inter-étatiques et académiques) et structuration de l'écosystème	c g	5 à 10 ans	Spécifique	Diffus	Non mesurable	Fort
h Impact territorial	Développement et capitalisation de nouveaux outils de calcul scientifique / normes de sûreté / méthodes de travail	c d e	5 à 10 ans	Spécifique	Diffus	Mesuré	Fort

Figure 46 : Description des différents éléments des schémas causaux selon la nomenclature d'évaluation du PIA [2/2]

Nomenclature des impacts du PIA	Impacts cartographiés	Nature d'impact					
			Échéance de l'impact	Focalisation sectorielle	Diffusion territoriale	Valeur	Impact
	Augmentation de la visibilité de la France et du CEA sur les enjeux liés au nucléaire	g	5 à 10 ans	Spécifique	National	Non mesurable	Fort
a Croissance	Création d'un effet d'entraînement sur le secteur privé	a b c	5 à 10 ans	Transversal	Diffus	Mesuré	Fort
b Créations d'emplois	Dév. / maintien en condition opérationnelle de compétences clés pour la filière	e	5 à 10 ans	Spécifique	Ciblé	Mesuré	Fort
c Compétitivité et performance des acteurs économiques	Application des innovations technologiques à d'autres secteurs	c d e	5 à 10 ans	Systémique	Diffus	Mesuré	Faible
d Accélération de l'innovation	Préfiguration du développement d'un réacteur 4G à neutrons rapides	d e	10 à 15 ans	Spécifique	Ciblé	Mesurable	Fort
e Effets en termes de capital humain et de savoir	Pérennisation de la filière RNR en France et capitalisation des connaissances sur le long terme	a e g	10 à 15 ans	Spécifique	Diffus	Non mesurable	Modéré
f Effets sur l'environnement et la santé	Renforcement des compétences et de la compétitivité de secteurs indu. connexes	a b c e	10 à 15 ans	Transversal	Diffus	Mesurable	Faible
g Structuration des écosystèmes	Accélération de la transition env. via une solution pour la production d'énergie décarbonée	f	Plus de 15 ans	Systémique	National	Non mesurable	Faible
	Amélioration de la gestion des matières et déchets nucléaires	f	Plus de 15 ans	Spécifique			
	Sécurisation des approvisionnements énergétiques de la France	c h	Plus de 15 ans	Systémique			

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

3.1 ASTRID a su dans l'ensemble atteindre les objectifs fixés dans sa convention

Une analyse du suivi des **différents indicateurs de performance** de la convention montre que le programme a pu dans l'ensemble atteindre les buts qui lui avaient été attribués. Ces objectifs, mesurés tout au long du programme, étaient pour rappel les suivants :

- **Respect de l'échéancier des études** de conception du réacteur ASTRID et des coûts associés ;
- **Taux de participation des partenaires** au financement du programme ASTRID ;
- **Proposition d'un dispositif de rémunération par les industriels** sur toute exploitation à des fins industrielles ou commerciales ;
- **Préparation d'un plan de financement et identification de partenaires pertinents** pour la phase de réalisation d'ASTRID.

La volonté des acteurs de l'époque était d'aboutir grâce à ces financements à la **preuve de la pertinence de la solution technique** ainsi qu'à une **estimation fiable des coûts** pour une **évaluation des enjeux financiers** liés au **passage à une échelle industrielle**, ambitions qui ont toutes été remplies à la clôture du programme fin 2019.

Il est à noter qu'un document de synthèse a été établi de manière conjointe par les parties prenantes en charge du suivi d'ASTRID, afin de répertorier les différentes évolutions du programme en regard de la convention signée en 2010 (évolutions de contenu, coûts et délais). L'ensemble de ces modifications sont détaillées dans le **suivi ci-dessous des différents objectifs de la convention**.

Figure 47 : Suivi des indicateurs quantifiés du programme ASTRID [phases AVP1 / AVP2]

Indicateurs de réalisation		Valeur mesurée	Valeur cible
1 Respect de l'échéancier des études	AVP1	100%	100%
	AVP2	100%	100%
2 Respect des coûts	AVP1	100%	100%
	AVP2	100%	100%
3 Taux de participation des partenaires	AVP1	28%	Objectif 30% (minimum 20%)
	AVP2	32%	Objectif 33% (minimum 23%)

3.1.1 Le programme a su respecter l'échéancier des études ainsi que les coûts projetés de conception du réacteur

Le programme ASTRID a su **respecter l'échéancier des études de conception** du réacteur et des **coûts associés** des phases AVP1 et AVP2, comme illustré dans le suivi des indicateurs de la **figure 47**.

Par suite de la remise en cause du **positionnement d'ASTRID 600 MWe** à partir de l'été 2017 et des profondes modifications apportées aux spécifications techniques du réacteur qui ont suivi (**cf. partie 2.1.3 du rapport**), la mesure des

indicateurs relatifs à ces objectifs fut **interrompue** pendant la phase d'APD. Toutefois, **deux points** sont à noter concernant cette dernière phase d'ASTRID :

- D'une part, le programme a bien **réalisé la conception d'un réacteur expérimental de petite puissance** (New ASTRID) au stade d'une étude d'esquisse, **conformément à la réorientation de l'action PIA**, actée par le comité de suivi en mars 2018 (**en lieu et place de la phase d'APD** du réacteur ASTRID 600 MWe) ;
- D'autre part, le CEA **n'a pas dépassé le montant des financements du programme** qui lui était alloué dans le cadre du PIA, et s'est aligné sur les **arbitrages budgétaires** rendus par l'Etat sur le budget quinquennal 2018-2022.

Enfin, il est à noter que par rapport à la convention de 2010, le **planning** des études de conception d'ASTRID a connu une **évolution en début d'AVP2**. En effet le cadrage budgétaire donné par le gouvernement au CEA fin 2012 pour les années suivantes ne permettait pas une **adéquation** entre le **besoin en effectifs** chargés de fournir les résultats de R&D et le **calendrier initial** des phases AVP2 et APD (qui devaient se terminer respectivement en 2014 et 2017).

3.1.2 Un effet de levier en ligne avec les objectifs attendus

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 du projet. Dans le détail, le **taux de financement des partenaires** a été de **28%** pour la phase d'AVP1 et de **32%** pour la phase d'AVP2 (supérieurs aux objectifs minimums respectivement de **20%** et de **23%**).

3.1.3 La proposition d'un dispositif de rémunération par les industriels est encore en cours de réalisation

A date d'écriture du rapport, il **n'existe pas d'exemple d'application** de ce **dispositif de rémunération**, pourtant prévu dans la **convention du programme**. Cette absence s'explique principalement par le fait que les équipes du CEA en charge du **suivi des répercussions d'ASTRID** doivent encore effectuer un travail de **collecte et d'analyse** des exemples de **valorisation potentielle** des **brevets et inventions** réalisés dans le cadre du programme. Ces données devront ensuite être **consolidées** de manière **systématique** afin de pouvoir proposer des **schémas de rémunération** ciblant les industriels pertinents.

Ainsi début 2020 seuls les partenaires du CEA ayant **co-financé des études et travaux** emploient les connaissances acquises pendant ASTRID. Ces utilisations ne nécessitent pas pour l'instant de passer par un dispositif de rémunération, en raison de la **part importante de propriété intellectuelle** reconnue à ces acteurs par le CEA concernant les **innovations / avancées techniques** en question.

3.1.4 La conception d'un plan de financement et l'identification de partenaires ont bien été mis en œuvre, avant d'être remplacés par de nouveaux objectifs

La réponse à l'indicateur relatif à la **conception d'un plan de financement et à l'identification des partenaires** pour la phase de réalisation d'ASTRID est passée par :

- Des **groupes de travail distincts**, combinant le CEA et les différents interlocuteurs potentiels ;
- Une **mission sous-traitée à un prestataire externe** en 2017 sur ces deux problématiques spécifiques. Celle-ci visait en particulier à :
 - **Analyser les possibilités offertes en termes de valorisation des actifs du programme**, via la création d'une **joint-venture** en partenariat avec d'autres acteurs ;
 - **Identifier des partenaires étatiques et industriels pertinents** en termes de collaboration pour la **construction du prototype ASTRID**.

Figure 48 : Principaux pays initialement identifiés dans le cadre du plan de financement du prototype

[Confidentiel]

Figure 49 : Présentation du plan de financement identifié à fin 2017

[Confidentiel]

Cependant, 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 les connaissances générées par le programme ASTRID**. Cette démarche devait passer par la réalisation d'un **dossier de fin de convention**, servant d'outil de recueil et de conservation des connaissances disponibles à la fin du programme. Il est à noter que cette **obligation a bien été remplie par le CEA**, comme illustré en détail dans la **figure 50**.

Figure 50 : Synthèse du dossier de fin de convention du programme ASTRID établi par le CEA à fin 2019

Dossiers d'ingénierie 	Installations 	Exécution du projet 	Organisation projet et REX 	Capitalisation des connaissances et perspectives 
Synthèse ASTRID 600 MWe SCE eau-Vapeur Dossier APS fin 2015 ASTRID 600 MWe SCE gaz Dossier mi-Basic Design fin 2017 New ASTRID Dossier Esquisse fin 2019 Fabrication des combustibles New ASTRID Dossier Esquisse fin 2019	Synthèse PLINIUS II Dossier études détaillées PAPIRUS En exploitation GISEH En exploitation CHEOPS Dossier études détaillées Rénovation MASURCA Dossier études détaillées	Comptes rendus des comités de suivi Rapport annuels PIA Synthèse financière	Organisation intégrée et agile PLM, design to cost... REX des outils digitaux Note organisation AFCOE	Rapports de synthèse par systèmes de l'arborescences (justification des choix d'options, solutions non retenues, etc.) Vidéo d'acteurs Catalogue innovations Catalogue brevets Synthèse et description détaillée des différents OCS Synthèse R&D (dossiers, matériaux,...) Compétences Programme post 2019

3.2 Les points d'améliorations du programme ASTRID

Malgré les nombreux apports positifs générés par ASTRID, des **critiques** et suggestions ont été remontées par des parties prenantes du programme. Ces points d'amélioration sont particulièrement intéressants dans la mesure où ils permettront de **mieux guider les futurs grands programmes** impulsés par des **agences et organismes étatiques**.

Tout d'abord, certains interlocuteurs ont souligné la trop **forte variabilité des orientations techniques** (à titre d'exemple, l'évolution du cahier des charges concernant la conversion d'énergie). Ces modifications ont notamment eu de forts impacts sur le **cahier des charges technique** de certains partenaires, obligeant ces partenaires à mettre à jour toute une partie des solutions développées précédemment afin de s'adapter à de **nouvelles contraintes**.

Les différences d'orientations au début de l'action entre le CEA, Framatome et EDF ont également été évoqués. Ainsi, même si ces 3 partenaires ont ensuite très vite recherché le consensus, cette **situation** a pu faire **perdre du temps** en termes de prise de décision en lien avec **plusieurs options structurantes** – les préconisations d'autres parties prenantes étant qu'il aurait fallu réaliser en **amont du programme un travail plus poussé d'alignement**.

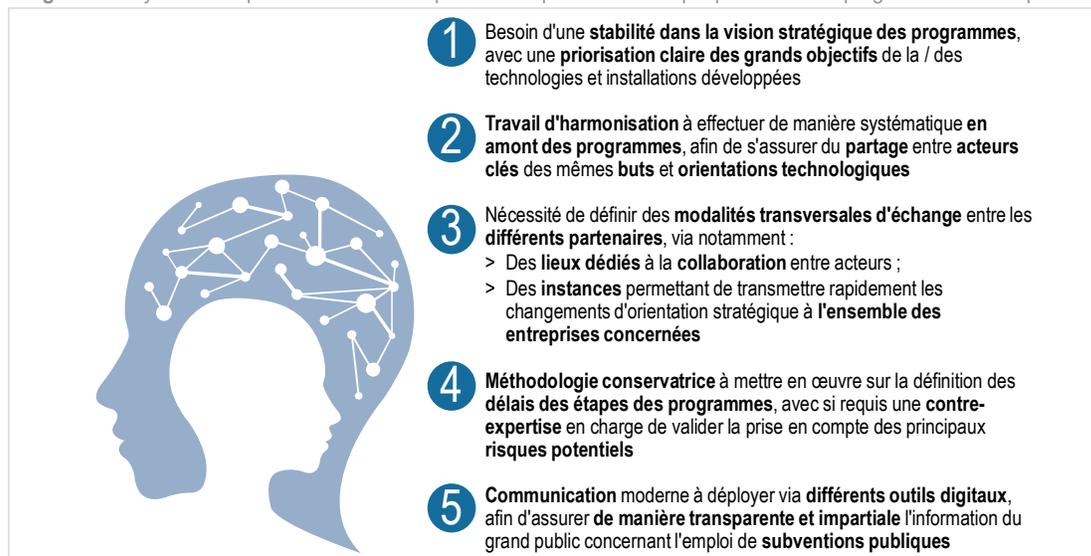
Par ailleurs, certaines critiques ont porté sur un **manque de communication** observé à des moments clés d'ASTRID. Ainsi, davantage **d'opportunités d'échanges** entre l'ensemble des partenaires et le CEA auraient pu permettre de **mieux préparer les évolutions majeures de configuration technique** et donc de limiter leur coût. Cette problématique liée au travail collaboratif s'est également retrouvée dans le constat d'une **absence de plateaux dédiés au travail entre partenaires sur des problématiques spécifiques**, ce qui a rendu les échanges d'informations plus complexes lors de **diverses phases critiques du programme**.

Enfin, en termes **d'objectifs et d'enjeux**, certains industriels ont pointé le **volontarisme trop fort** du CEA, avec des **délais parfois très ambitieux** ne prenant pas suffisamment en compte **l'ensemble des risques technologiques** potentiels – même si cet organisme a su ensuite de **manière flexible** rallonger les délais des différentes phases. Cela a notamment généré le déploiement de **moyens importants** pendant une **période restreinte**, générant des problématiques de **montée en compétence** puis de **maintien d'expertise** de différents industriels partenaires du projet.

Enfin, **3 derniers points** ont été remontés, avec des **enjeux moindres** en termes d'impact :

- Certains **partenaires** éloignés des sujets du nucléaire civil ont souligné la **complexité de la coopération avec les acteurs historiques** de la filière en début de programme. Cette situation a toutefois été bien gérée par le CEA, qui a réussi à **apaiser les méfiances entre entreprises** et à créer une atmosphère de travail plus collaborative ;
- Le fait que le programme ait **changé plusieurs fois de direction et de chefs de projet** côté CEA a pu **engendrer des gênes** pour certains partenaires au moment des **transitions** (en particulier en termes de maîtrise de l'historique du projet) ;
- La **couverture médiatique dans l'ensemble relativement négative** du programme a fait regretter à plusieurs intervenants majeurs d'ASTRID l'**absence d'une communication moderne tournée vers le grand public** (qui aurait par exemple pu passer par la **création de comptes officiels Twitter / Facebook** dédiés).

Figure 51 : Synthèse de points d'amélioration potentiels à prendre en compte pour de futurs programme de R&D publics



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

3.3.1 Le programme a permis de stimuler la croissance économique et de générer de nombreux emplois

Impacts en termes de croissance et de fiscalité

Au vu de la modélisation, le programme semble avoir permis de **renforcer la croissance de notre pays**, avec près de **95%** des dépenses d'ASTRID dirigées vers des entreprises françaises. En analysant **l'ensemble des financements** des différents acteurs (pour un total de **~1,2 Mds EUR**), la modélisation effectuée montre :

- Un **impact PIB cumulé potentiel de 2,3 Mds EUR** pour l'action PIA 1 ASTRID à l'horizon 2030 ;
- Un **effet retour pour les finances publiques** de l'ordre de **1,4 Mds €** annuels pour cette même échéance.

Notre **méthodologie** repose sur les éléments suivants :

- La **répartition de l'ensemble des dépenses de l'action PIA ASTRID** par catégorie (soutien aux entreprises, salaires et traitements, achat de matériel / travaux publics) ;
- L'intégration d'un **multiplicateur keynésien** variant en fonction de la **nature des différentes dépenses**, tel que détaillé en **figure 52** ;
- Le **calcul de ces impacts PIB** par année en fonction de la **catégorisation** (régionalisée) des dépenses du programme ;
- La prise en compte d'autres externalités potentielles : intégration à **plus de 10 ans** (via le multiplicateur) des **impacts d'ASTRID** liés à la **structuration d'écosystèmes** et à la **R&D** sur la croissance économique (pour les catégories de dépenses pertinentes) ;
- La **détermination du retour fiscal direct** sur la base de la **fiscalité applicable aux entreprises**, et celle du **retour fiscal indirect** en employant un **multiplicateur de PIB** (basé sur la **part des prélèvements de l'Etat** pour 1 euro de PIB généré).

Figure 52 : Eléments clés de notre méthodologie de modélisation économique de l'action PIA ASTRID

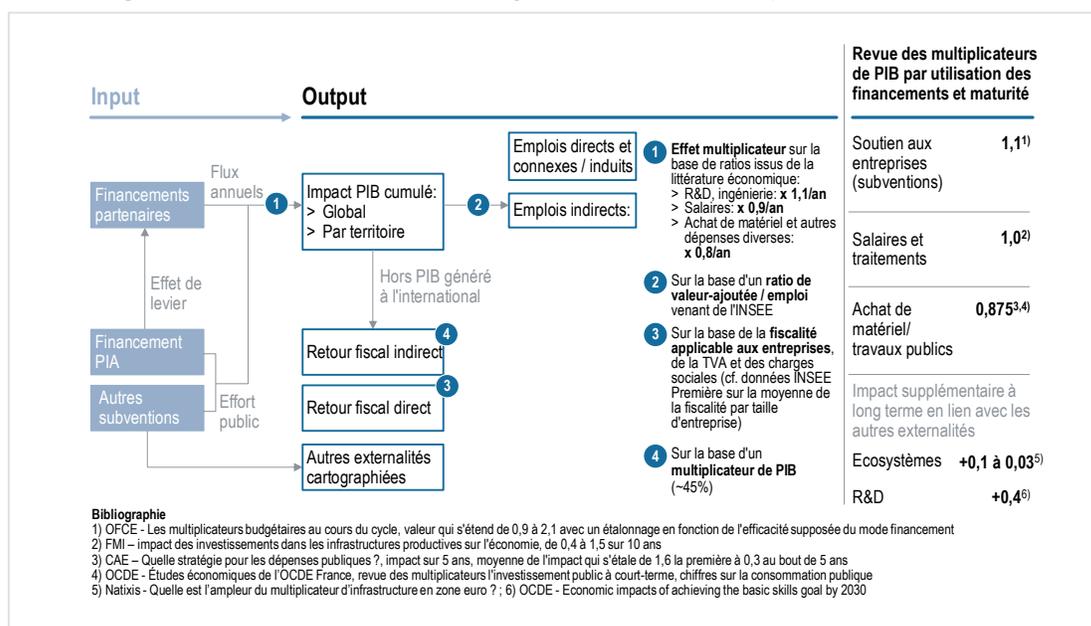


Figure 53 : Impacts PIB cumulés régionalisés de l'action PIA ASTRID [m EUR, 2010-2029]

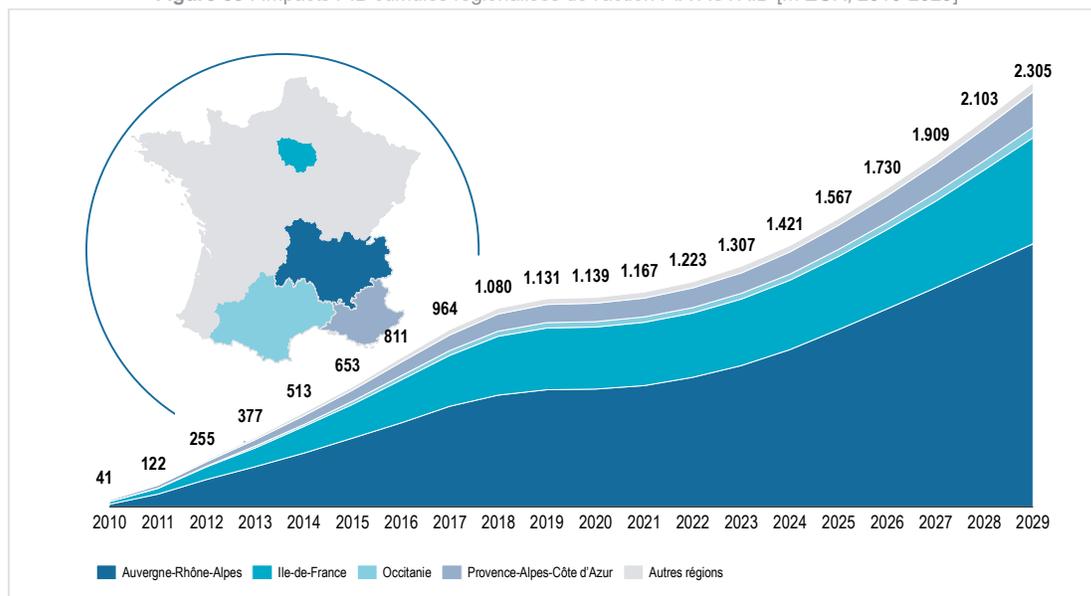
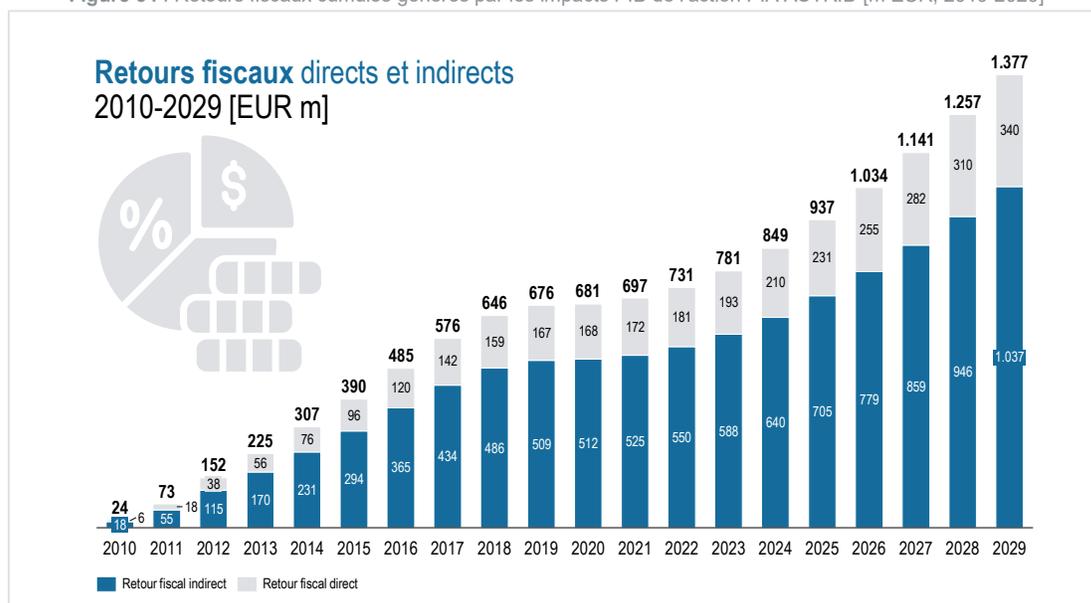


Figure 54 : Retours fiscaux cumulés générés par les impacts PIB de l'action PIA ASTRID [m EUR, 2010-2029]

**Impacts en termes de création d'emplois directs**

Au total, près de **490 emplois directs** ont été créés chaque année via ASTRID par le **CEA et ses différents partenaires** entre 2011 et 2019. Par rapport aux **586 m EUR** (coût réel pour l'Etat) de financements du PIA 1, cela signifie **qu'un emploi direct a été engendré pour chaque tranche de 132 k EUR de dépenses publiques**. Les emplois générés chaque année de **2011 à 2019** se répartissent de la manière suivante :

- **Emplois directs du CEA** : en moyenne, près de **270 ETP** ;
- **Emplois directs des partenaires industriels du programme** : en moyenne, près de **170 ETP** ;
- **Emplois directs des partenaires de R&D du programme** : en moyenne, près de **50 ETP**.

Les **partenaires industriels et de R&D d'ASTRID** ont donc contribué à la création de plus de **45% des emplois directs du programme**.

Dans le détail, les **emplois engendrés au CEA** se décomposent de la manière suivante : il s'agit à **74% d'ingénieurs**, à **21% de techniciens** et à **5% de postes concernant l'encadrement d'ASTRID**.

Ces effectifs sont à **85% tournés vers la R&D** (regroupant la très nette majorité des postes d'ingénieurs et de techniciens), tandis que **15% des postes sont dédiés à d'autres fonctions** (catégorie recoupant notamment les postes d'encadrement).

Le **volume important de ces effectifs est d'autant plus notable** qu'une grande partie de ces partenaires n'ont rejoint le programme qu'à **partir de 2014 / 2015**.

Figure 55 : Répartition par catégorie des emplois directs générés au CEA par le programme [ETP, 2011-2019]

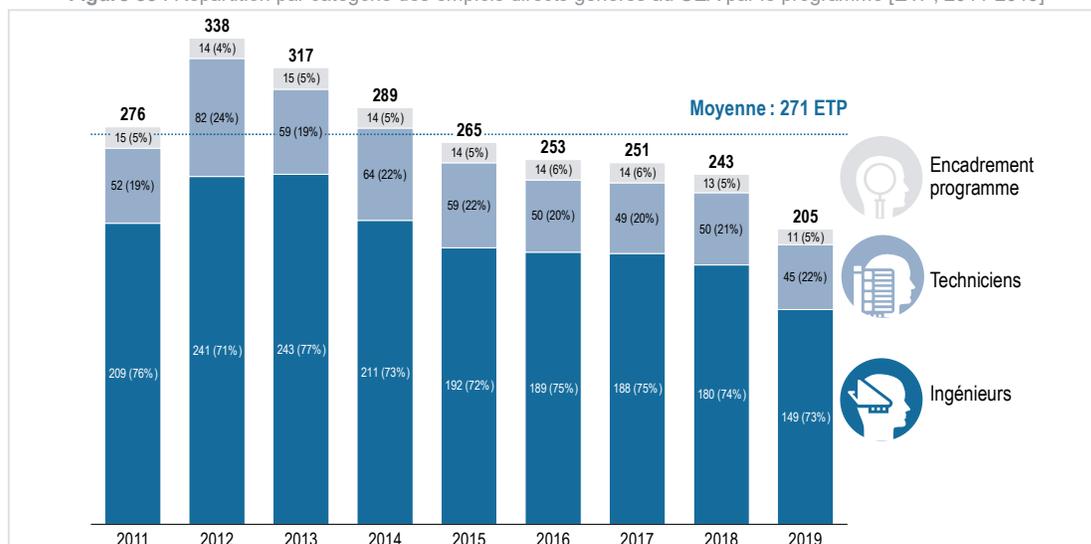


Figure 56 : Emplois directs générés par ASTRID chez les partenaires industriels [ETP, 2011-2019]

[Confidentiel]

Figure 57 : Emplois directs engendrés par ASTRID chez les partenaires de R&D [ETP, 2011-2019]

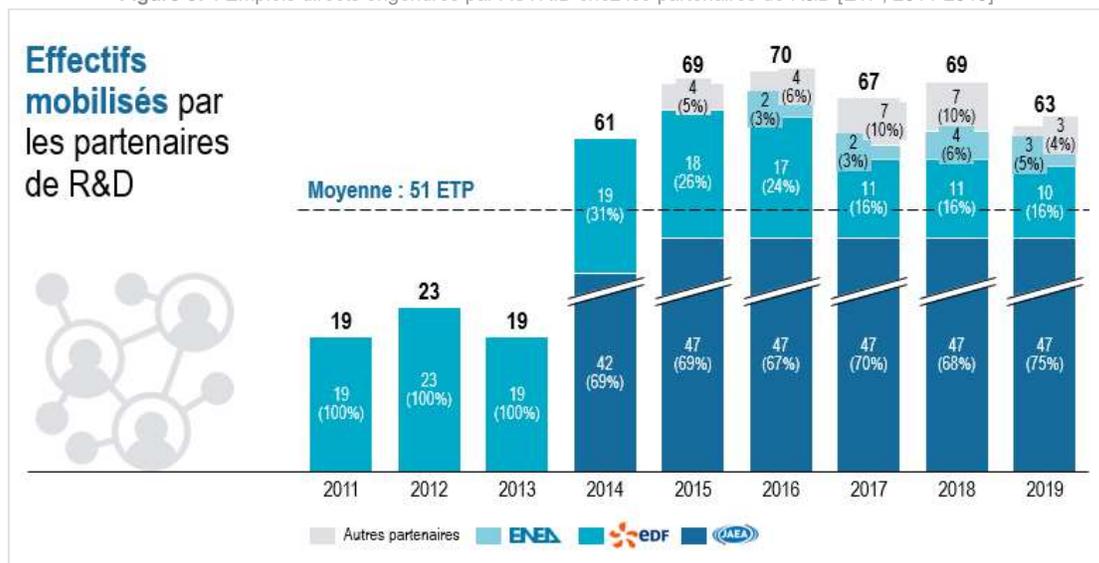
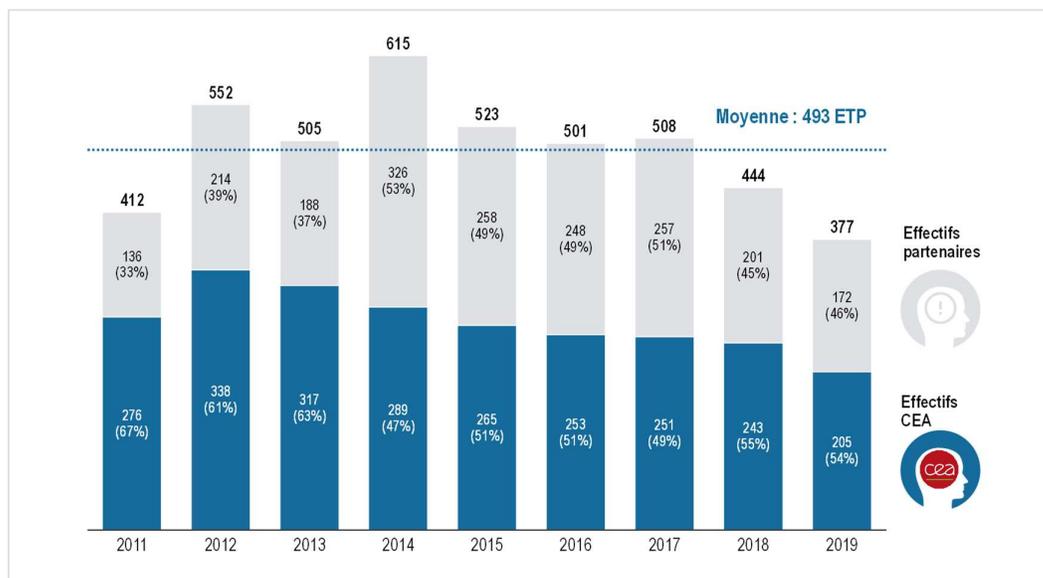


Figure 58 : Nombre total d'emplois directs créés par le programme [ETP, 2011-2019]



Impacts en termes de création d'emplois induits / connexes

Sur la base du nombre d'emplois directs créés, on peut estimer que près de 1.200 ETP induits / connexes ont été générés pendant le programme. Cela représente un ratio de ~2,5 par emploi direct, basé sur :

- La part historique de l'industrie en France pour les emplois connexes ;
- Des coefficients multiplicateurs moyens de l'INSEE pour les emplois induits.

Pour rappel :

- Les **emplois connexes** regroupent l'ensemble des activités de sous-traitants / fournisseurs en lien direct avec les emplois directs générés ;
- Les **emplois induits** représentent les ETP en lien avec l'activité économique induite par la présence de salariés sur un territoire (commerçants, services à la personne, etc.)

Impacts en termes de création d'emplois indirects

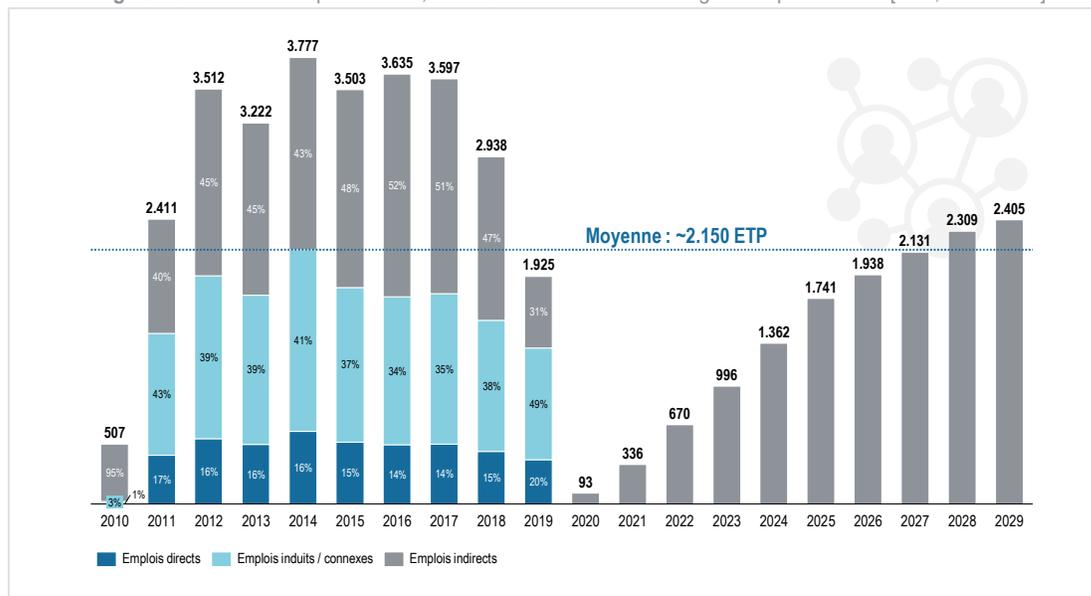
Pour calculer le nombre d'emplois indirects générés, notre méthodologie :

- Part des flux additionnels d'impacts PIB chaque année ;
- Puis les multiplie par un ratio de valeur-ajoutée / emploi par secteur d'activité issu des données de l'INSEE, en repartant de la répartition sectorielle des dépenses du programme ASTRID.

Ainsi, ces emplois indirects sont la traduction des impacts PIB générés par le programme, sur la base de la valeur ajoutée moyenne d'un emploi. Sur la base de ces calculs, on arrive ainsi à une moyenne de ~1.400 emplois indirects générés chaque année entre 2010 et 2029, soit un emploi indirect pour ~84 k EUR de flux d'impacts PIB.

Au total, on obtient un effet de ~2.150 emplois créés / maintenus chaque année de 2010 à 2029 via l'ensemble des dépenses liées au programme ASTRID.

Figure 59 : Total des emplois directs, induits / connexes et indirects générés par ASTRID [ETP, 2010-2029]



3.3.2 ASTRID a permis une considérable accélération de l'innovation, non seulement dans le nucléaire mais également dans différents secteurs connexes

Le programme ASTRID a permis de faire de la France un des acteurs de référence sur le sujet du développement de technologies innovantes concernant la 4^{ème} génération de réacteurs nucléaires, et de ce fait a généré de nombreuses externalités en lien avec l'innovation.

Il est à noter que les données concernées sont sous-estimées, du fait d'une culture du secret propre au secteur nucléaire – venant du rôle clé en termes de souveraineté nationale des programmes de recherche de cette filière. Aussi, une

part non négligeable (mais complexe à évaluer à date) des découvertes effectuées dans le cadre d'ASTRID n'ont pas fait l'objet de **brevets ni d'articles scientifiques dédiés**.

4 principales catégories d'externalités en lien avec l'innovation ont pu être analysées :

- Dépôt de **nombreux brevets** ;
- Découverte de **multiples innovations** par le CEA et ses différents partenaires ;
- Stimulation des **installations et équipements de recherche** ;
- **Mobilisation d'effectifs de R&D** chez les partenaires et les sous-traitants.

De nombreux brevets déposés pendant le programme...

67 brevets ont été développés pendant le programme par la R&D interne du CEA et ses **partenaires**. Ainsi, un travail de fond a été réalisé par le CEA – en collaboration avec les industriels de la filière – pour **protéger au mieux les différentes inventions réalisées** au cours du programme. En 2019, le CEA avait **40 familles de brevets** actifs issus d'ASTRID, parmi lesquelles environ **la moitié** serait potentiellement **valorisable hors du nucléaire**.

Cependant, en dépit du fort potentiel de ces brevets, le CEA n'a pas encore mené **d'action de valorisation systématique**, notamment auprès de pays étrangers développant leurs propres programmes sur les RNR-Na. Ce chantier demeure complexe, en particulier en raison du coût de maintien des différents brevets déposés, pouvant conduire à **l'abandon de leur soutien dans la durée** (d'autant plus que la **pérennisation des brevets déposés** ne rentre pas dans les **indicateurs de suivi de l'Etat** concernant les opérateurs publics de recherche).

Les brevets déposés concernent principalement les **grandes thématiques suivantes** : ingénierie, pompes, turbines ; matériaux, métallurgie ; génie chimique ; semi-conducteurs ; machines-outils ; traitement des fluides ; appareils et procédés thermiques ; éléments mécaniques ; énergie, machines et appareils électriques ; technologies de visualisation ; mesures (cf. **figure 60**).

Les **figures 62 à 64** fournissent le **détail des différents brevets générés**, ainsi que leurs externalités concernant :

- Les **réacteurs de 4^{ème} Génération** hors RNR-Na ;
- Les **autres générations** de réacteurs ;
- Les **secteurs d'activité** en dehors du nucléaire.

Près de **93% des brevets déposés ont des applications externes aux RNR-Na**, dont **35% dans d'autres secteurs que le nucléaire**. Ces derniers sont principalement les suivants :

- **Pharmacologie, chimie** ;
- **Métallurgie, verriers** ;
- Industries intervenant en **milieu hostile** (environnement irradiant, plomb, fibre, ...)
- Industries utilisant des **métaux liquides** (photovoltaïque, ...).

Il est à noter que le **nombre de brevets par million d'euros de dépenses publiques** est relativement inférieur au benchmark des différentes actions du PIA 1, **trois facteurs** principaux expliquant cette tendance :

- ASTRID est une **action industrielle**, dont l'objectif ne portait pas sur la génération de brevets – contrairement à d'autres **projets financés dans le cadre du PIA 1**. Ainsi, en opérant une **distinction par type d'action**, on constate qu'ASTRID est dans une **fourchette en ligne avec d'autres actions comparables** ;
- Le CEA et ses partenaires ont fait le **choix de ne pas déposer certains brevets**, car le nucléaire est un **enjeu de souveraineté de premier ordre** dans lequel une certaine **culture du secret** peut s'avérer nécessaire ;
- Des questions **d'ordre budgétaire** – notamment pour certains partenaires (Framatome en particulier) – ont également **impacté à la baisse** le nombre de brevets déposés. Ainsi, de **nombreuses analyses de brevetabilité** menées n'ont pas été poursuivies, en raison d'**enjeux commerciaux sous-jacents parfois limités** menant à des arbitrages de non-dépôt de brevet.

Figure 60 : Synthèse des brevets déposés pendant l'action PIA ASTRID

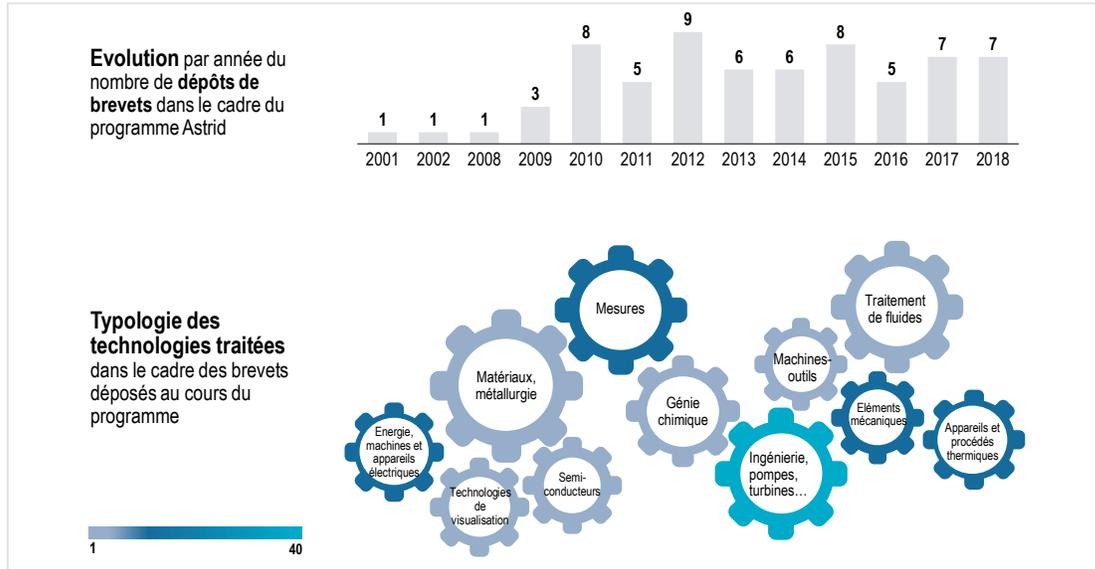


Figure 61 : Liste des applications (hors RNR-Na) des brevets du programme

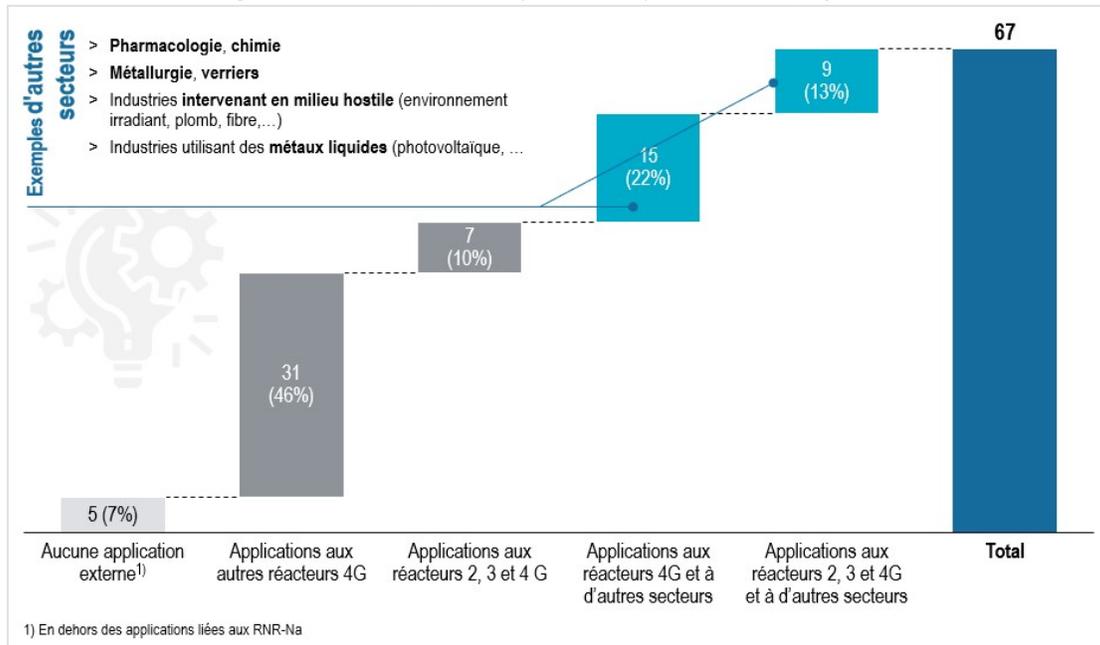


Figure 62 : Liste détaillée des brevets des brevets déposés pendant ASTRID et détail de leurs applications [1/3]

Nom brevet	Déposant(s)	Autres GEN 4	GEN 2/3	Autres secteurs	Détail sur les autres secteurs concernés	# brevets
Cœur de réacteur à neutrons rapides, refroidi par un métal liquide, à faible effet de vidange	cea	✓	X	X		1
Dispositif de mitigation des accidents graves pour assemblage de combustible nucléaire à efficacité améliorée	cea	✓	X	X		1
Dispositif de détection de fuites et revêtement d'organe de transport ou de stockage de fluide comportant ce dispositif de détection	cea	✓	X	X		1
Aiguille de combustible nucléaire métallique comprenant une enveloppe avec des fibres de SiC	cea	✓	X	X		1
Dispositif et procédé de remplacement d'un assemblage combustible irradié par un assemblage combustible neuf dans la cuve d'un réacteur nucléaire et réacteur nucléaire comprenant un tel dispositif	cea	✓	X	X		1
Bouchon couvercle cœur et mécanisme de barre de commande pour réacteur nucléaire	cea	✓	X	X		1
Assemblage pour réacteur nucléaire, comportant du combustible nucléaire et un système de déclenchement et d'insertion d'au moins un élément absorbant neutronique et/ou mitigeur	cea	✓	X	X		1
Installation de manutention d'assemblages de combustible nucléaire usés, depuis une cuve de réacteur remplie de métal liquide, notamment d'un réacteur de type RNR-Na, procédé de mise en œuvre et centrale nucléaire à au moins deux réacteurs associés	cea	✓	X	X		1
Réacteur nucléaire rapide intégré, refroidi par un métal liquide, à échangeur intermédiaire annulaire et moyens de sûreté passifs	cea	✓	X	X		1
Dispositif de contrôle nucléaire pour réacteur refroidi au métal liquide de type RNR	cea	✓	X	X		1
Dispositif d'évacuation de la puissance résiduelle d'un réacteur nucléaire à neutrons rapides, intégré à un échangeur de chaleur intermédiaire, et réacteur comportant ce dispositif	cea	✓	X	X		1
Cœur de réacteur à neutrons rapides	framatom	✓	X	X		1
Réacteur nucléaire intégré à neutrons rapides comportant au moins deux cœurs de pile	cea	✓	X	X		1
Réacteur à neutrons rapides, à cœur contenant des éléments combustibles à basse température de fonctionnement nominal, et préférentiellement de faible diamètre, et un matériau modérateur	cea	✓	X	X		1
Assemblage combustible pour réacteur nucléaire de type RNR-Na, à boîtier logeant un dispositif de protection neutronique supérieure solidarisée de manière amovible	cea	✓	X	X		1
Dispositif de manutention de barre absorbante de contrôle d'un réacteur nucléaire	cea, ONET	✓	X	X		1
Dispositif de manutention de barre d'un réacteur nucléaire et dispositif amortisseur magnétique de déplacement linéaire	cea, ONET	✓	X	X		1
Assemblage pour réacteur nucléaire de type RNR-Na, à boîtier muni de plaquettes d'espacement à raideur améliorées	cea, framatom	✓	X	X		1
Dispositif de déclenchement et d'insertion d'éléments absorbants et/ou mitigeurs dans une zone fissile d'un réacteur nucléaire et assemblage de combustible nucléaire comportant un tel dispositif	cea / STE	✓	X	X		1

Figure 63 : Liste détaillée des brevets des brevets déposés pendant ASTRID et détail de leurs applications [2/3]

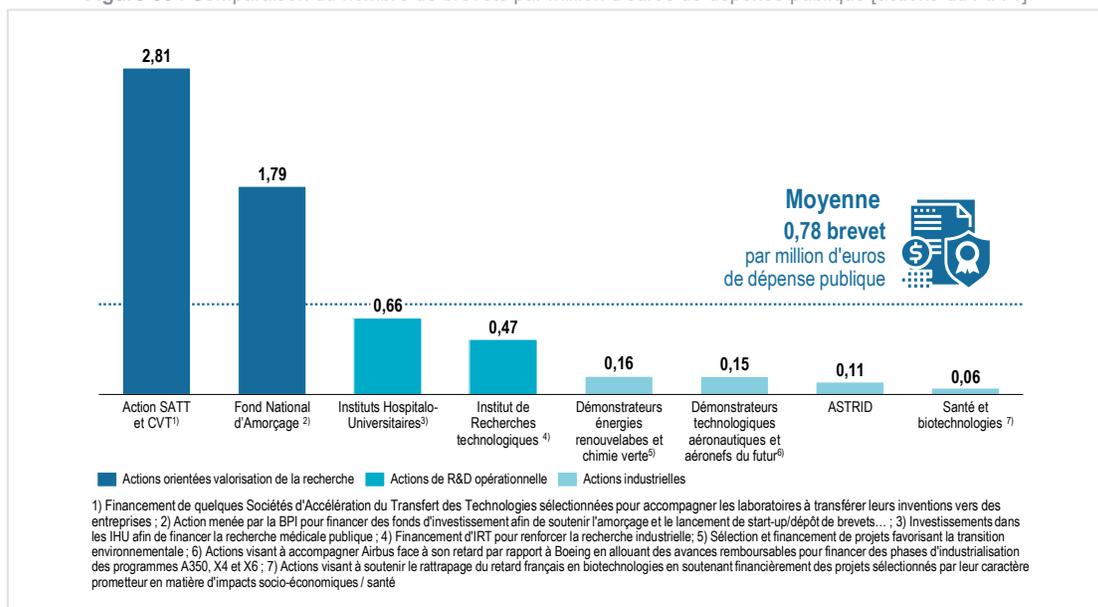
Nom brevet	Déposant(s)	Autres GEN 4	GEN 2/3	Autres secteurs	Détail sur les autres secteurs concernés	# brevets
Dispositif de sûreté à déclenchement passif pour réacteur nucléaire sur une baisse anormale du débit primaire	cea	✓	X	X		1
Dispositif de freinage de l'élément mobile d'un assemblage d'absorbants d'un réacteur nucléaire à neutron rapides	cea	✓	X	X		1
Assemblage pour réacteur nucléaire de type RNR-Na, à liaison sans soudure réversible entre le boîtier d'assemblage et un élément d'assemblage inséré dans le boîtier	cea	✓	X	X		1
Assemblage de mitigation pour réacteur nucléaire comportant un bouchon d'étanchéité amovible	cea	✓	X	X		1
Dispositif de manutention pour assemblage combustible et ensemble de manutention comprenant un tel dispositif	cea	✓	X	X		1
Structure étanche pour assemblage de maîtrise de la réactivité de réacteur nucléaire à neutrons rapides	cea	✓	X	X		1
Réacteur nucléaire à sel fondu	cea	✓	X	X		1
Assemblage pour réacteur nucléaire comportant une enveloppe étanche	cea	✓	X	X		1
Collecteur de fluide à coques multiples pour échangeur de chaleur avec circulation du fluide collecte entre les coques	cea	✓	X	X		1
Collecteur de fluide à coques multiples pour échangeur de chaleur avec circulation entre les coques d'un fluide distinct de celui de collecte	cea	✓	X	X		1
Système de régulation d'un liquide dans un circuit	cea	✓	X	✓		1
Echangeur de chaleur entre deux fluides, utilisation de l'échangeur avec du métal liquide et du gaz, application à un réacteur nucléaire à neutrons rapides refroidi avec du métal liquide	cea	✓	X	✓	Industries utilisant des métaux liquides (photovoltaïque, etc.)	1
Dispositif de détection de fuite et revêtement comportant ce dispositif de détection	cea	✓	X	✓		1
Vanne pour circulation de fluide	cea, HZDR	✓	X	✓		1
Module d'échangeur de chaleur à échange thermique et compacité améliorés, utilisation avec du métal liquide et du gaz, application à un réacteur nucléaire à neutrons rapides refroidi avec du métal liquide	cea	✓	X			1
Module d'échangeur de chaleur à plaques dont les canaux intègrent en entrée une zone de répartition uniforme de débit et une zone de bifurcations de fluide	cea	✓	X			1
Méthode et système pour la détermination sans calibrage de la vitesse d'écoulement d'un fluide conducteur de l'électricité	cea, HZDR	✓	X		Industries utilisant des métaux liquides (photovoltaïque, etc.)	1
Dispositif de détection de fuite	cea	✓	X			1
Réacteur nucléaire intégré à neutrons rapides comportant un dispositif de verrouillage passif du chemin hydraulique	cea	✓	X			1
Inducteur magnétique, pompe électromagnétique comportant un tel inducteur magnétique et procédé de fabrication d'un inducteur magnétique	cea	✓	X			1



Figure 64 : Liste détaillée des brevets des brevets déposés pendant ASTRID et détail de leurs applications [3/3]

Nom brevet	Déposant(s)	Autres GEN 4	GEN 2/3	Autres secteurs	Détail sur les autres secteurs concernés	# brevets
Procédé d'assemblage d'un inducteur magnétique et inducteur magnétique susceptible d'être obtenu avec un tel procédé	CEA	✓	X			2
Système de détection de fuite d'un fluide conducteur d'électricité depuis une enveloppe	CEA	✓	X			1
Dispositif de vérification de l'intégrité d'un système de détection de court-circuit	CEA	✓	X		Industries utilisant des métaux liquides (photovoltaïque, etc.)	1
Procédé de fabrication d'un capteur piézoélectrique et capteur piézoélectrique obtenu par un tel procédé	CEA	✓	X			1
Dispositif et procédé d'assistance au chargement et déchargement du cœur d'un réacteur nucléaire à caloporteur sodium et réacteur nucléaire à caloporteur sodium comprenant un tel dispositif	CEA	✓	✓	X		1
Procédé de détermination de taux vide par spectrométrie de résonance acoustique non linéaire dans un milieu diphasique et application dans un réacteur nucléaire	CEA	✓	✓	X		1
Dispositif récupérateur de corium dans l'intercuve d'un réacteur nucléaire et réacteur nucléaire mettant en œuvre un tel dispositif	CEA	✓	✓	X		1
Système d'évacuation de la puissance résiduelle d'un réacteur nucléaire à neutrons rapides, utilisant une convection forcée dans l'espace intercuve	CEA	✓	✓	X		1
Dispositif de mesure de la puissance résiduelle d'un assemblage combustible usé, destiné à être déchargé d'un réacteur refroidi au métal liquide, tel qu'un réacteur RNR-Na ou SFR, intégrant un dispositif de mesure de la puissance résiduelle	CEA	✓	✓	X		1
Appareil de chargement / déchargement d'assemblage combustible d'un réacteur refroidi au métal liquide, tel qu'un réacteur RNR-Na ou SFR, intégrant un dispositif de mesure de la puissance résiduelle	CEA, framatome	✓	✓	X		1
Dispositif pour la manutention sécurisée d'un composant d'une installation nucléaire	CEA	✓	✓	X		1
Procédé de soudage à relaxation des contraintes résiduelles	CEA	✓	✓	✓	Sect. indus. utilisant des composantes mécaniques fonctionnant dans un env. complexe	
Dispositif de détermination de mouillage d'une paroi par un liquide	CEA	✓	✓	✓	Pharmacologie, chimie	1
Traducteur ultrasonore Haute Température utilisant un cristal de niobate de lithium brasé avec de l'or et de l'indium	CEA	✓	✓	✓	Industries utilisant des métaux liquides (photovoltaïque, etc.)	1
Système hexapode	CEA	✓	✓	✓	Industrie de l'assainissement / démantèlement réacteur nucléaire	1
Bras articulé	CEA	✓	✓	✓	Toute industrie devant intervenir en milieu hostile (milieu irradiant, plomb, fibre, ...)	1
Four à chauffage par induction électromagnétique, utilisation du four pour la fusion d'un mélange de métal et d'oxyde(s) représentatif d'un corium	CEA	✓	✓	✓	Métallurgie, verrier, vitrification déchets (oxyde haute température)	2
Four à creuset froid à chauffage par deux inducteurs électromagnétiques, utilisation du four pour la fusion d'un mélange de métal et d'oxyde(s) représentatif d'un corium	CEA, ECM	✓	✓	✓		2

Figure 65 : Comparaison du nombre de brevets par million d'euros de dépense publique [actions du PIA 1]



... En lien avec de multiples innovations pour le CEA

En lien avec le dépôt de ces brevets, le programme a permis de développer plus de **41 innovations**. Ces dernières nécessitent une **analyse spécifique** dans la mesure où elles ne sont pas totalement **homogènes aux brevets générés**

(certains brevets n'étant pas liés à une innovation spécifique, et réciproquement). Près de **98% des innovations du programme** ont des applications **externes aux RNR-Na**, dont **49% dans d'autres secteurs que le nucléaire**. Ces applications sont **plus diverses** que dans le cas des brevets, à savoir :

- **Métallurgie, verriers** ;
- **Vitrification / traitement de déchets et matières toxiques** ;
- Secteur **aéronautique** (fabrication de **moteurs d'avion**) ;
- Applications nécessitant une **étanchéité** et une **fonctionnalité** assurée par **couplage magnétique** ;
- **Toute industrie** :
 - Employant des **échangeurs compacts à plaques** ;
 - Présentant des **risques sismiques** importants liés à des **produits dangereux** ;
 - Intervenant en **milieu extrême / hostile** ;
 - Avec des **problématiques** liées aux **milieux sodium et hydrogène** (capteurs, mesure de la vitesse, détection de fuite, etc. – mais aussi export de nouvelles briques technologiques dans des industries comme celle des panneaux solaires, potentiellement utilisateurs de sodium) ;
 - Utilisant des **métaux liquides**.

Les **figures 67 et 68** fournissent le **détail des différentes innovations**, ainsi que leurs externalités.

Par suite de la clôture du programme, un sujet se pose sur la **mise en valeur des innovations obtenues auprès de partenaires étrangers**. Si une petite **partie d'entre elles** ont déjà pu être mobilisées auprès d'autres pays tels que les Etats-Unis, la Chine, la Belgique, etc., il existe encore un **besoin important de valorisation**. Cette problématique est d'abord à un **niveau inter-étatique**, une grande partie des innovations du programme étant liée aux **réacteurs nucléaires** et ne pouvant par conséquent que difficilement trouver des **débouchés directs dans le secteur privé**. Aussi, se pose la **nécessité de définir une stratégie cohérente et structurée** pour **maximiser le retour sur investissement de l'Etat et du CEA** des investissements publics réalisés dans le cadre d'ASTRID.

Figure 66 : Liste des applications (hors RNR-Na) des innovations de l'action PIA ASTRID

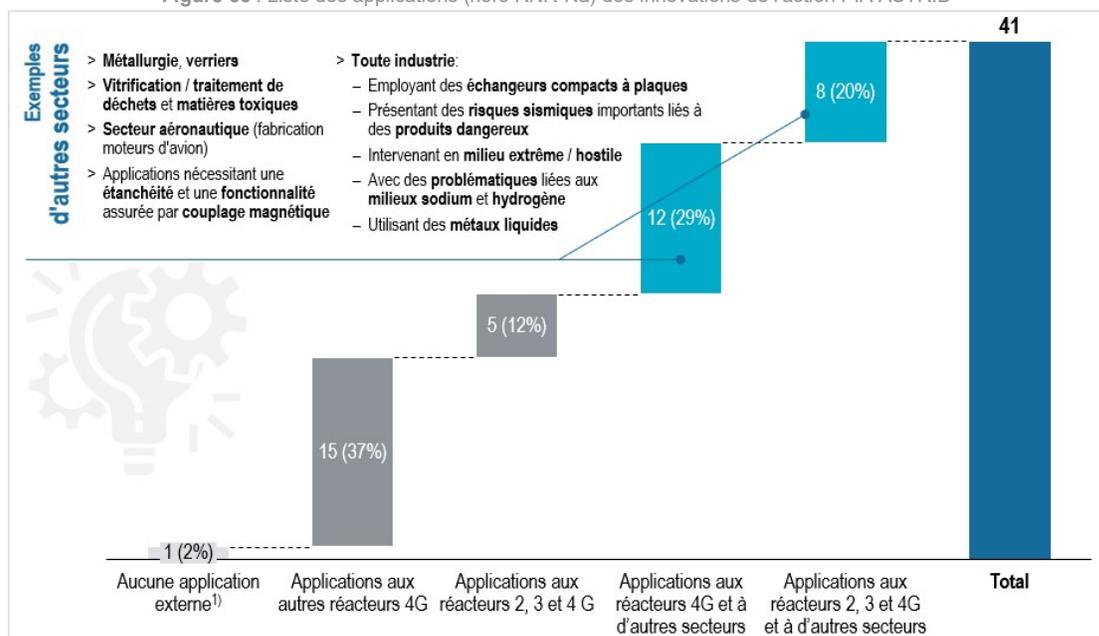


Figure 67 : Liste détaillée des innovations réalisées pendant le programme ASTRID (1/2)

Nom de l'innovation	Concepteur(s)	GEN 4 ¹⁾	GEN 2/3	Autres secteurs	Description des applications
Jupe de sauvegarde ultime du sodium	CPA / framatom	X	X	X	
Détection acoustique passive	R&D / framatom	✓	X	X	
Cœur à faible coefficient de vidange	R&D	✓	X	X	
Joint d'étanchéité du bouchon tournant	R&D / TGF	✓	X	X	
Joint statique de traversée	R&D / TGF	✓	X	X	
Turbomachines à gaz	CPA / General Electric	✓	X	X	
Optimisation Thermomécanique de l'Echangeur Intermédiaire	CPA / framatom	✓	X	X	
Mise à jour du référentiel normatif	CPA	✓	X	X	
DHARS à travers la cuve	CPA /	✓	X	X	
Débit de sodium	CPA / framatom	✓	X	X	
Fibre optique Réseau de Bragg	R&D / DRT	✓	X	X	
CFHT	R&D	✓	X	X	
Cœur CADOR	RNRNA	✓	X	X	Autres industries travaillant en milieu sodium
Cartographie HT Dynamique	R&D	✓	X	X	
PNS démontable	R&D / DEC	✓	X	X	
Liaison PNS clipsée	R&D / DEC	✓	X	X	
Barres hydrauliques	R&D	✓	✓	X	
Architecture RID	R&D	✓	✓	X	
Architecture de mitigation	CPA / SFRAG	✓	✓	X	
Raccord en T entre le sommier et la pompe primaire	CPA / framatom	✓	✓	X	
Essai non destructif sous sodium	R&D	✓	X	✓	Autres industries utilisant des métaux liquides

1) Autres que RNR-Na

Figure 68 : Liste détaillée des innovations réalisées pendant le programme ASTRID (2/2)

Nom de l'innovation	Concepteur(s)	GEN 4 ¹⁾	GEN 2/3	Autres secteurs	Description des applications
Capteurs EMAT	R&D / DRT	✓	X	✓	Autres industries utilisant des métaux liquides
Porteur sous sodium	R&D	✓	X	✓	Autres industries utilisant des métaux liquides
Vannes d'isolement - boucle de sodium secondaire	CPA / VELAN	✓	X	✓	Autres industries utilisant des métaux liquides
Pompe électro-magnétique	R&D	✓	X	✓	Autres industries utilisant des métaux liquides
Système de détection de fuite	R&D	✓	X	✓	Autres industries utilisant des métaux liquides
Point Electromagnétique de Curie	CPA / R&D / QARA / framatom	✓	X	✓	Toute industrie ayant besoin de systèmes passifs de contrôle en haute température. Autre industrie en milieu nocif nécessitant une étanchéité et une fonctionnalité assurée par couplage magnétique
Mécanisme de Barre	CPA / ONET	✓	X	✓	
Echangeur de chaire à plaques	R&D	✓	X	✓	Industries utilisant des compacts à plaques
Débitmètres à Distorsion de Flux et application CTD	R&D	✓	X	✓	Autres industries utilisant des métaux liquides
High Temperature Ultrasonic Transducer	R&D	✓	X	✓	Autres industries utilisant des métaux liquides
Oxygénomètre	R&D	✓	X	✓	
Fabrication B4C par le SPS	R&D	✓	✓	X	Industries nécessitant protection haute température, moteurs d'avion
Inspection Intercuve	CPA / ONET	✓	✓	✓	Autre industrie en milieu hostile (robotique d'accès)
Détection d'hydrogène à basse température	R&D / framatom	✓	✓	✓	Autres industries utilisant le milieu hydrogène vis-à-vis des problématiques de sécurité
Structure mixte (acier-béton)	CPA / AMEC	✓	✓	✓	Tous les bâtiments complexes nécessitant une préfabrication en usine
Plot parasismique	CPA / AMEC / ENIM	✓	✓	✓	Autres industries avec une sensibilité aux séismes par rapport des enjeux liés à des produits dangereux / toxiques
Télémanipulation assistée par ordinateur	CPA / SEIV	✓	✓	✓	Autres industries en milieu extrême nécessitant manipulation à distance
Frein de sécurité dans la structure de transfert	CPA / framatom	✓	✓	✓	Traitement déchets et confinement de matières toxiques / radioactives
Développement gaine SIC avec tantale étanche	R&D	✓	✓	✓	
Four PLINIUS-2	PLINIUS	✓	✓	✓	Autres industries type verrier, sidérurgie, vitrification déchets

1) Autres que RNR-Na;

De nombreux impacts en termes d'innovations pour les partenaires et certains sous-traitants du programme

Les **partenaires** du programme ainsi que **certaines sous-traitants spécifiques** ont eu l'opportunité grâce à ASTRID de **réaliser des innovations**, en y dédiant des **heures spécifiques** dans le cadre des **différents accords plafonnés négociés** – ce qui a engendré de nombreuses externalités. Ce dispositif s'est accompagné d'un **support du CEA** afin de **faciliter la valorisation de ces technologies**, en allant jusqu'à la **preuve de concept** sur divers items de l'arborescence produit ASTRID. Dans le détail, on observe les **exemples suivants** :

[Confidentiel]

Impact des plateformes et installations développées dans le cadre du programme

La **rénovation et le développement de différentes plateformes et installations** par le CEA via ASTRID a également permis de stimuler l'innovation, à travers **4 leviers** :

- La **réalisation de nombreux tests et expérimentations** pendant le programme ;
- Le **développement de nouvelles technologies** relatives aux objectifs ambitieux de performance de ces installations ;
- L'**utilisation post 2019** des installations finalisées (Papyrus, Gizeh, etc.) – en lien avec le programme de **développement des RNR** et du cycle sur des **objectifs de pure R&D à partir de 2020** ;
- L'emploi de ces installations pour la R&D concernant les **réacteurs 3G (sûreté pour l'installation Plinius-2, problématiques thermohydrauliques pour d'autres, etc.)**

De plus, si **3 grandes d'installations** prévues dans le cadre de la construction d'ASTRID n'ont pas abouti en termes de construction (**MASURCA, CHEOPS et Plinius-2**), il est à noter que ces projets ont mené à des **études de conception**, pour lesquelles il existe un fort potentiel de valorisation.

Enfin la **rénovation de plateformes expérimentales** a également concerné certains partenaires du CEA, à savoir **Framatome au Creusot et Bertin CNIM dans les Landes**. Ainsi, le programme ASTRID a **alimenté ces plateformes**, permettant :

- Leur **remise à niveau** pour répondre aux objectifs du projet ;
- Que ces plateformes viennent aujourd'hui répondre à **d'autres besoins potentiels**.

Mobilisation de nombreux effectifs de R&D

Le programme ASTRID a enfin permis de **fortement développer l'innovation** via la **mobilisation de nombreux effectifs de R&D**, avec 4 échelons :

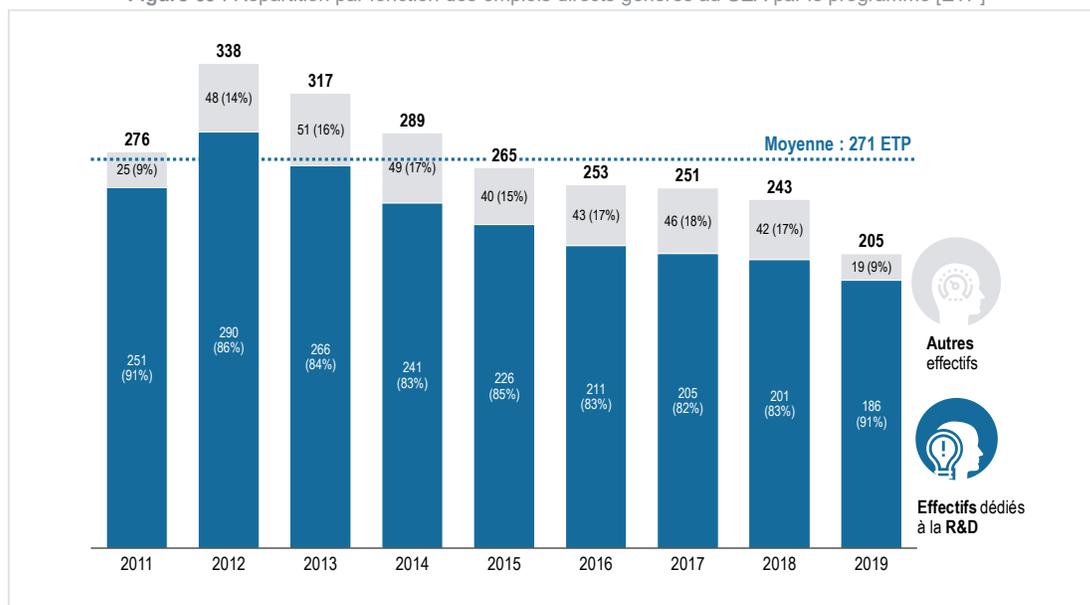
- L'implication de chercheurs et d'ingénieurs **au sein du CEA** ;
- L'effort spécifique apporté par les **partenaires industriels et de R&D** ;
- L'utilisation de **sous-traitants** sur ce type de problématiques ;
- L'emploi de **contrats de collaboration de R&D** avec les **laboratoires de différentes universités**.

Les externalités générées par ces effectifs se situent à 3 niveaux :

- **Maintien et diffusion de savoirs** liés à l'industrie nucléaire ;
- **Synergies en termes de connaissance**, favorisant l'innovation dans d'autres domaines ;
- **Soutien / pérennisation de postes de R&D**, ayant permis à **différentes équipes de recherche** ainsi qu'à certaines spécialités de :
 - Conserver une **taille critique** ;
 - **Maintenir leur existence** via les financements que représentaient ASTRID.

Tout d'abord, ASTRID a permis de **dédier de nombreux effectifs au CEA à des problématiques de R&D**, avec en moyenne **250 à 300 ETP mobilisés spécifiquement** – toutefois de fortes variations s'observent par année, avec un **pic d'activités de recherche** notable entre 2012 et 2014 puis une **décroissance progressive** par la suite.

Figure 69 : Répartition par fonction des emplois directs générés au CEA par le programme [ETP]



Les **partenaires** ont également eu un **impact très important sur les externalités générées** en termes de **R&D**, avec :

- Près de **46 ETP utilisés en moyenne par JAEA sur des problématiques de R&D d'ASTRID**, sur un ensemble de **problématiques très diverses** ;
- **20 ETP** mobilisés pendant leur participation au programme par les autres **partenaires de R&D** (universités européennes hors France et EDF) ;
- **2 à 3 ETP employés par Framatome tout au long du projet**, cette entreprise ayant également participé avec EDF au co-financement de la recherche du CEA. Les ressources déployées ont principalement porté sur de la **R&D méthode**, afin de faire **progresser les outils et méthodes** sous-jacents à la conception du réacteur ;
- **Quelques ETP** dédiés de manière ponctuelle par **Ariane Group**, sur des périodes allant uniquement de quelques jours à quelques semaines. Les sujets de R&D traités par cette entreprise ont principalement été en lien avec les **matériaux thermostructuraux** et les **tests d'ergol** ;
- **Un poste d'ingénieur spécialisé** sur les **matériaux élastomères** créé par Technetics ;

Les **partenaires suivants n'ont pas déployé d'ETP spécifiques** sur des sujets de R&D, leurs innovations ayant été conçues par leurs équipes d'ingénierie : **Onet Technologies, Bouygues, Alstom, Alcen SEIV, Velan et CNIM**.

De plus, **des missions de R&D furent ponctuellement sous-traitées** à des entreprises – l'ensemble des acteurs et des sujets concernés étant recensés dans la **figure 70**.

Figure 70 : Cartographie des sous-traitants de R&D mobilisés par le CEA pendant ASTRID

[Confidentiel]

Enfin, la **figure 19** illustre la **répartition des contrats de collaboration** en termes de **R&D** réalisés avec des établissements d'enseignement supérieur en France, recoupant des **zones géographiques très variées** – avec comme **principaux acteurs concernés** : l'université Aix-Marseille, l'université de Bordeaux, l'université de Toulouse, Mines Paris Tech, Centrale Supélec, INSA Lyon, l'Université de Clermont-Ferrand, etc.

3.3.3 ASTRID a permis de renforcer la compétitivité et la performance des acteurs économiques impliqués sur le programme

Sur la base des retours de nos entretiens avec les différentes parties prenantes d'ASTRID, nous notons que le programme a permis de **renforcer la compétitivité** et la **performance** de ces **acteurs 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 des 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 en lien avec les différentes problématiques des RNR-Na) ;
- L'accès à :
 - La **filière nucléaire civile** pour les nouveaux entrants
 - De **nouveaux contrats / autres domaines d'activités** pour les partenaires déjà présents dans ce secteur.

Renforcement de l'attractivité en tant qu'employeurs

Un **impact économique important** du programme est le rôle qu'il a joué sur la marque employeur des principaux acteurs mobilisés. Ainsi, **l'image forte d'excellence de ce projet** a pu servir de facteur différenciant clé aux divers partenaires (en particulier ceux à **faible notoriété** en raison de leur taille / présence modeste dans le secteur du nucléaire). **Plusieurs PME** ont en effet pu se positionner sur les sujets les plus complexes de leur cœur de métier (cf. ECM Technologies pour le four de l'installation PLINIUS-2) et / ou renvoyer une image RH attractive via cette référence de premier plan. Cette dynamique a permis de **les tirer vers le haut** via le **levier que représentait** le recrutement de profils pointus, qui ont ensuite pu être mobilisés sur des **problématiques complexes dans d'autres projets**.

Développement de nouvelles méthodes de travail

Les nombreuses méthodes de travail développées pendant le programme ont eu un impact important **tant pour le CEA que pour ses divers partenaires**. Pour le premier, l'ensemble des méthodes novatrices d'ASTRID ont pu être **remobilisées sur d'autres projets** (ex : projet *Small Modular Reactor*), permettant des **gains de productivité** considérables et une **montée en puissance** plus rapide.

Le principal partenaire ayant **bénéficié des retombées économiques** liées à ces méthodes de travail est **Framatome**, avec près de **30 autres projets impactés**. En effet, l'ampleur du programme (**1,7 m heures d'ingénierie**) a permis de développer :

- De **l'expérience de gestion de projet** ;
- Des **méthodes et outils sophistiqués et performants** (maquettes 3D, modèles de collaboration avec les partenaires, partage de ressources et de documents avec des nouveaux outils, etc.)
- Des **retours d'expérience sur ces outils** ;
- Des **solutions techniques** adaptées aux spécificités de Framatome.

L'élément clé en lien avec ces impacts est la **mobilisation à temps partiel des personnels impliqués sur ASTRID** (en particulier ceux avec une expertise très spécifique), qui a permis de **diffuser rapidement les retours d'expérience** aux équipes impliquées sur d'autres projets.

Les autres partenaires ont également pu bénéficier de **gains de productivité** (quoiqu'à des degrés divers), via la réplification des différents acquis du projet en termes d'expérience – ASTRID ayant permis de **conforter leurs connaissances** sur des problématiques allant des **méthodologies de collaboration entre entreprises** aux **process de capitalisation des connaissances**.

Figure 71 : Illustration des impacts économiques pour Framatome des méthodes et outils développés pendant ASTRID [1/2]
[Confidentiel]

Figure 72 : Illustration des impacts économiques pour Framatome des méthodes et outils développés pendant ASTRID [2/2]
[Confidentiel]

Développement et harmonisation de logiciels / outils scientifiques

Les **avancées considérables sur les logiciels et outils scientifiques** réalisées par le CEA et ses partenaires ont généré des **externalités économiques via 2 leviers** :

- Un **alignement des outils des acteurs de la filière**, leur permettant une collaboration plus efficace sur d'autres projets (ex : mêmes outils de gestion de la configuration des réacteurs sur le projet *Small Modular Reactor*) ;
- Une **amélioration de l'efficacité opérationnelle des outils existants**, en termes de fiabilité des résultats mais aussi d'optimisation de l'utilisation de capacités de calcul.

Maintien d'économies d'échelles

Le programme a également eu un **impact important sur la compétitivité de la filière**, dans la mesure où il a permis de **régénérer le tissu industriel** du secteur nucléaire, qui s'était fortement rétréci au cours des dernières années. Ainsi, les principaux acteurs de la filière subissaient le **contrecoup de la baisse des investissements nationaux dans ce domaine** (en particulier pour les RNR-Na, suite à l'arrêt du réacteur SuperPhénix), avec :

- Une **réduction** tendancielle du **nombre de sous-traitants** ;
- Une **diminution** de la **palette d'expertise à leur disposition dans leurs effectifs** ;
- Une **perte** en termes d'**atteinte de certaines économies d'échelle** (laboratoires, installations et équipements divers, coûts fixes de fabrication, etc.).

ASTRID a donc permis de **remobiliser ces entreprises**, en :

- Donnant accès à la filière à de **nouveaux acteurs de rang 2**, représentant autant de **nouveaux fournisseurs potentiels** - avec la capacité de recréer une **supply chain fonctionnelle** en termes de compétences sur la partie phase d'études des RNR-Na ;
- Permettant de **recréer / développer de nombreuses expertises** (en permettant des recrutements d'experts dont l'activité était en partie couverte par les besoins du programme ASTRID) ;
- Leur faisant atteindre une **taille plus critique**, permettant de rendre soutenable différents **coûts fixes**.

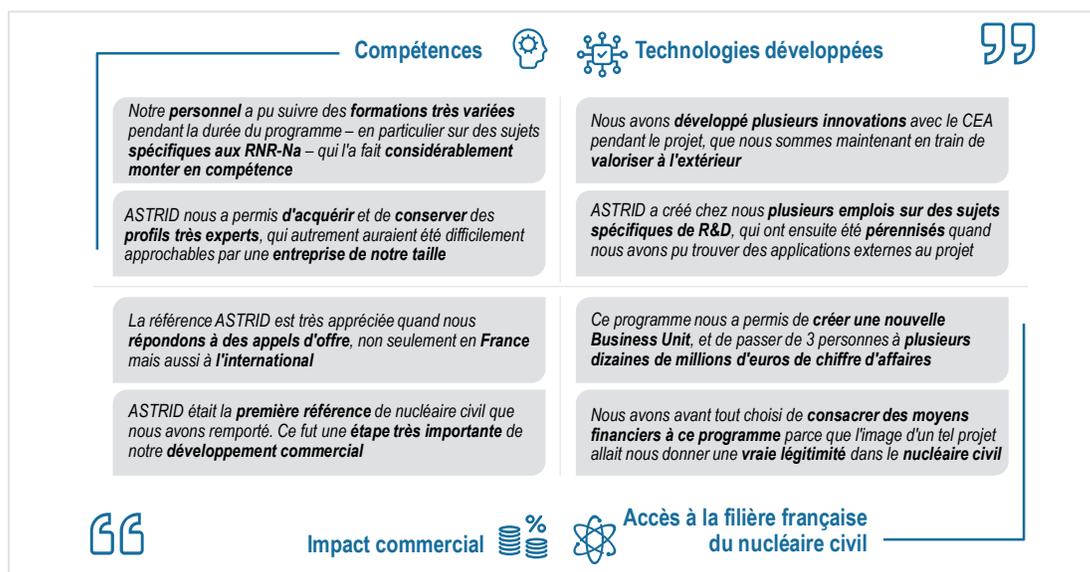
Accès à la filière nucléaire et à de nouvelles opportunités commerciales

Il reste à date **complexe de quantifier les impacts économiques directs du programme** en termes de **gains de chiffre d'affaires** pour les partenaires / sous-traitants (hors revenus liés à ASTRID) – en particulier dans la mesure où le marché des RNR-Na reste encore une **niche limitée à quelques projets spécifiques**.

Toutefois, en termes de **développement commercial**, un impact peut être noté à **travers 4 leviers** :

- La **forte visibilité** des partenaires **en France et à l'international** a fortement contribué au gain de certains contrats. Ainsi, ils ont pu candidater à de **nombreux autres projets** grâce aux compétences acquises dans le cadre du programme :
 - **Plusieurs PME et ETI** (Velan, CNIM, ...) ont pu s'appuyer sur la référence de premier plan que représentait le programme ASTRID pour **se projeter sur de nouveaux marchés** (cf. développement de Velan en Chine), l'habilitation du programme ASTRID étant pleinement intégré à leurs **objectifs commerciaux** ;
 - Les entreprises de taille plus conséquente ont également noté des **retombées commerciales indirectes**. A titre d'exemple, **Framatome** s'est ainsi positionné sur le sujet du **réacteur VTR** grâce aux échanges du CEA avec son équivalent aux Etats-Unis – des discussions ayant été lancées pour **l'établissement d'un partenariat industriel** ;
 - Les nouveaux entrants dans le secteur nucléaire (ALCEN, SEIV, Ariane Group, ...) ont su **développer de nouveaux comptes dans le nucléaire civil**, en remportant des réponses à des appels d'offre grâce à la **référence projet majeure** que représentait leur participation à ASTRID ;
- En termes de **développement commercial**, ASTRID a **facilité la collaboration entre partenaires / sous-traitants** concernant différents appels d'offres, qui se sont ensuite traduits par des **projets concrets** (comme **Bouygues / Ariane Group** pour le centre du CEA de **Marcoule**, ou **Ariane Group / ECM Technologies** pour le centre du CEA de **Valduc**) ;
- Les **différentes technologies développées par les partenaires** ont pu mener à **plusieurs contrats** (y compris dans d'autres secteurs que le nucléaire) – sans qu'il ne soit encore possible de quantifier précisément cet impact, dans la mesure où la quasi-totalité de ces exemples de valorisation sont encore en cours de concrétisation ;
- Enfin, ASTRID a permis à certains industriels de roder leur **méthodologie d'approche commerciale / partenariale** sur de nouveaux secteurs (en particulier pour les nouveaux entrants dans la filière).

Figure 73 : Synthèse des retours des partenaires concernant l'impact d'ASTRID sur leur compétitivité et performance économique



3.3.4 Une remobilisation en termes de capital humain pour la filière des RNR-Na, avec de nombreuses externalités générées en termes de savoir

ASTRID a généré des externalités en termes de capital humain et de savoir à travers **5 facteurs** :

- La réalisation d'environ **1.500 formations** (en comptabilisant uniquement celles d'une durée de plus d'une journée) ;
- 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 de la France ;
- Le recours à de **nombreux sous-traitants en ingénierie**, qui ont pu développer leurs expertises grâce au programme ;

Formations effectuées dans le cadre d'ASTRID

De nombreuses formations ont été effectuées au cours du programme, selon différentes modalités :

- **801 actions de formation** centrées sur les **RNR-Na** ainsi que sur des **thématiques associées**, réalisées principalement par l'INSTN ainsi que l'Ecole du Sodium – permettant aux équipes du CEA et de ses partenaires de monter en compétences sur des sujets **tant généraux que techniques**. Dans le détail, près de 30% des formations de l'INSTN ont été à destination des partenaires (cf. **figure 75**) ;
- **200 actions formations et ateliers** organisés au travers des **contrats européens** (pour les personnels des organismes de R&D européens) ;
- **250 actions de formations internes au CEA**, ayant concerné à la fois des **thématiques techniques** mais aussi les **nouvelles méthodes de travail** (cf. organisation entre R&D de différentes entités, coordination concernant le projet de réacteur, etc.) ;
- **250 actions de formations** spécifiques menées par deux grands partenaires (**Framatome et Ariane Group**) pour leurs employés ;
- Enfin, **900 actions de formations** dédiées à la **sûreté des installations sodium** (à la fois des personnels du CEA et des partenaires) – non comptabilisées dans la **figure 74** en raison de leur durée très brève (une demi-journée).

Figure 74 : Décomposition des actions de formations menées pendant ASTRID [> 1 journée, # actions de formation]

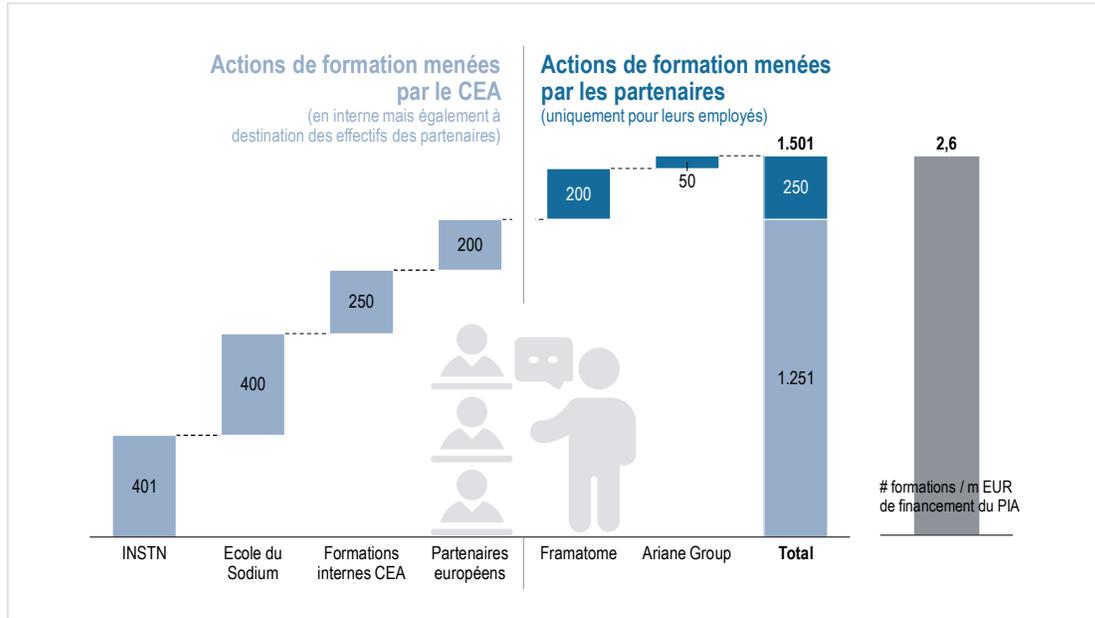
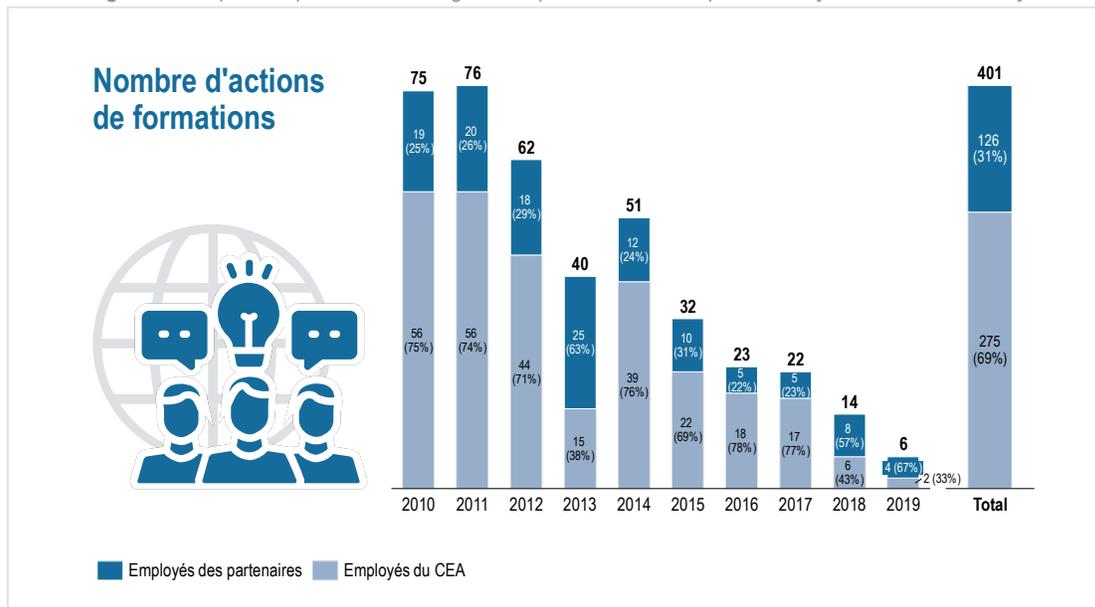


Figure 75 : Répartition par année et catégorie des personnels formés par l'INSTN [# actions de formation]



Remobilisation et montée en compétences sur les RNR-Na

ASTRID a eu un impact social notable dans la mesure où ce programme a permis la **remobilisation de nombreuses compétences concernant les RNR-Na**, ainsi que la **montée en puissance de plusieurs acteurs** sur des problématiques associées. Ainsi, ce programme a généré une **remise à niveau globale des compétences de design autour des RNR**, en permettant de **mettre à jour et développer les expertises des nombreux employés impliqués au cœur de la réalisation de ses différents sous-projets** – dans un contexte où les générations qui avaient été en contact avec les projets **Phénix** et **SuperPhénix** commençaient à partir à la retraite :

Cet effet se constate tout d'abord **au sein du CEA**, où de nombreux jeunes ingénieurs ont pu être formés via 2 échelons :

- La **prolongation du programme Phénix de 2005 à 2010** ;
- **ASTRID de 2010 à 2019**.

Ce sont donc plus de **15 années de développement continu des RNR-Na** qui ont pu être employées dans la formation opérationnelle de nouveaux employés, avec en parallèle la **volonté de s'appuyer sur les compétences encore disponibles d'ingénieurs** impliqués dans la conception des anciennes générations de réacteurs au sodium.

ASTRID a également permis aux **grands industriels de la filière nucléaire française** une **remontée rapide en compétence** sur les sujets propres aux RNR-Na. Cet effet est d'autant plus notable que l'absence de projet d'envergure majeure sur cette thématique depuis les années 1990 avait considérablement dégradé le niveau d'expertise des acteurs privés. Le programme s'inscrit donc dans la **volonté de faire renaître un tissu industriel spécifique** à ce type de réacteur, en valorisant **des connaissances qui commençaient à tomber dans l'oubli**. Cette problématique était en particulier valable pour Framatome, qui parmi les différents partenaires dispose de **l'expertise à la fois la plus pointue et la plus spécifique aux RNR-Na**. Ainsi, ce projet a permis la montée en compétences de **plusieurs centaines d'ingénieurs de cette entreprise**, tant via des actions de formation spécifiques qu'à travers des **dimensions d'apprentissage opérationnel** des ETP mobilisés de 2010 à 2019.

Le **dimensionnement conséquent d'ASTRID** a donc permis le renouvellement de l'ensemble des **porteurs de connaissances** de cette entreprise, dans un contexte où ce transfert s'avérait **critique** en raison d'un **arrêt prolongé des programmes nationaux** portant sur les RNR-Na.

L'impact est également **conséquent** pour les **nouveaux entrants dans le secteur du nucléaire**, qui ont noté des **transferts de connaissance réussis** grâce à la mobilisation et à l'intégration pendant le programme aux **industriels historiques de la filière** (exemple : ECM Technologies a par exemple pu consolider plusieurs compétences portant sur les **briques technologiques spécifiques** aux **four**s employés pour les **tests de sûreté nucléaire**).

L'ensemble de ces effets furent renforcés par le **déploiement à la fin du programme** des processus très novateurs de **"Knowledge Management"** (cf. **partie 2.1.6 du rapport**) afin de conserver au mieux les connaissances d'ASTRID pour les générations futures. Les **domaines concernés sont très divers** : compétences techniques de design de RNR, sûreté, codification des matériaux, fabrication, radiations, etc.

Toutefois, l'arrêt du programme nécessite de trouver des solutions palliatives pour maintenir les compétences acquises. Cet enjeu se pose en particulier pour Framatome, en raison de la **spécificité** et du **niveau d'expertise pointu** des connaissances développées par cet acteur. Ainsi, la fin de l'action ASTRID est un sujet critique pour cette entreprise en termes de maintien de compétences, en particulier dans un contexte d'**absence d'autres projets comparables en Europe**.

Cet acteur est actuellement en train d'essayer de limiter ces impacts via **3 leviers** :

- Une réflexion pour **proposer son expertise à l'international**, via des partenariats avec des acteurs étatiques travaillant sur les RNR-Na ;
- Des **redéploiements en interne** sur d'autres projets expérimentaux de réacteurs nucléaires (ex : projet *Small Modular Reactor*) ;
- Le **regroupement** et la **mutualisation** de l'ensemble des ressources dédiées aux problématiques liées aux réacteurs 4G, afin de pouvoir atteindre plus facilement une masse critique.

Framatome a également lancé la **création d'une Ecole de Design** afin de **valoriser l'ensemble des acquis d'ASTRID** en termes de méthodes de travail, design, outils, méthodes innovations, etc. Cette école vise les **objectifs suivants** :

- Conserver les **capacités de design** des personnels impliqués pendant le programme ;
- Transférer des **connaissances et pratiques** vers de **nouvelles générations d'ingénieurs** ;
- Continuer à faire **progresser les différents outils et méthodes** du projet, en vue de leur utilisation dans **d'autres contextes** (cf. par exemple projet de l'EPR) ;
- **Renforcer l'attractivité de Framatome en tant qu'employeur auprès des jeunes ingénieurs**, avec une école ayant une véritable vocation de vitrine technologique.

Cet enjeu se retrouve également au CEA, mais **dans une moindre mesure** en raison de la continuité de la R&D sur les RNR, au-delà de 2019. Le point clé pour cet organisme est que les personnels mobilisés sur les thématiques spécifiques de R&D du RNR-Na aient pu voir leurs activités pérennisées.

La problématique immédiate concernait les **personnels de la Cellule Projet Astrid**, qui avaient une fonction assez unique au sein de cet organisme (Chefs de projet, architectes industriels). Leur redéploiement a permis de démarrer plus rapidement de nouveaux projets (en particulier le projet collaboratif *Small Modular Reactor*), de renforcer les autres projets de l'organisme (réacteur de recherche Jules Horowitz) via l'application de méthodes, innovations et connaissances pratiques liées à ASTRID.

Sur le long terme, le maintien des compétences au CEA reste un challenge. Le risque d'érosion existe compte-tenu de la perte d'attractivité du sujet et des mobilités internes et externes. L'implication du CEA dans des réalisations à l'étranger (projets de réacteur et autres expérimentations) via des **partenariats internationaux approfondis** (suivant l'exemple **franco-japonais**) sera sans doute clés pour pouvoir **maintenir au meilleur niveau** les compétences françaises sur les RNR-Na.

Cette problématique semble moins critique pour les autres partenaires, dans la mesure où :

- Les **compétences développées portent sur des sujets plus décorrés des RNR-Na**, et pourront s'entretenir via d'autres projets (que ce soit dans le nucléaire ou dans d'autres secteurs) ;
- La **méthodologie déployée de Knowledge Management** devrait être suffisante pour **remobiliser rapidement les compétences spécifiques** acquises au cours du projet en cas de **changement d'orientation** de la politique française concernant les RNR-Na (en raison de l'écart relativement moins élevé en termes de contexte d'application spécifique par rapport à d'autres projets).

De nombreux travaux de recherche et thèses réalisés au cours du programme

Environ **25 thèses ont été réalisées chaque année** pendant le programme : ainsi, **~180 thésards** et **~25 postdoctorants** ont réalisé des travaux de recherche dans le cadre d'ASTRID – en comptabilisant **uniquement les thèses pour lesquelles**

le CEA a eu un rôle d'encadrement et / ou de financement direct. 200 ingénieurs ayant en moyenne été mobilisés par le CEA pendant le programme, cela représente donc 1 étudiant réalisant une thèse pour 6 à 7 encadrants potentiels.

La répartition des thématiques de ces thèses est détaillée en figure 76 : sur les 186 thèses menées au CEA depuis 2010 on en compte 25 dans le domaine des combustibles, 67 concernant les matériaux, 16 sur les études liées aux accidents graves, 46 en lien avec les technologies sodium et 32 portant sur les codes de calculs et la simulation des RNR. Ainsi, les thèses réalisées pendant ASTRID ne sont pas toutes spécifiques à ce programme ni même au nucléaire, et pourront à l'avenir potentiellement être employées dans d'autres domaines d'application (même si pour l'instant ces effets n'ont pas encore été mesurés).

L'ensemble de ces différents travaux représente ~0,3 thèse et ~0,05 postes de doctorant par million d'euro de dépense du PIA. Environ 75% des thèses effectuées au CEA dans le cadre d'ASTRID l'ont été en cotutelle avec une université, à savoir principalement : Aix-Marseille Université, Paris Saclay, Mines Paris Tech, Centrale Paris, INSA et l'Université de Toulouse. Il est à noter qu'en plus d'avoir permis de faire avancer la conception du démonstrateur dans de nombreux domaines, ces travaux ont considérablement consolidé la présence du CEA au sein du monde académique (via l'intensification des échanges avec différentes universités).

Figure 76 : Répartition par catégorie des différentes thèses menées dans le cadre du programme ASTRID [# thèses]

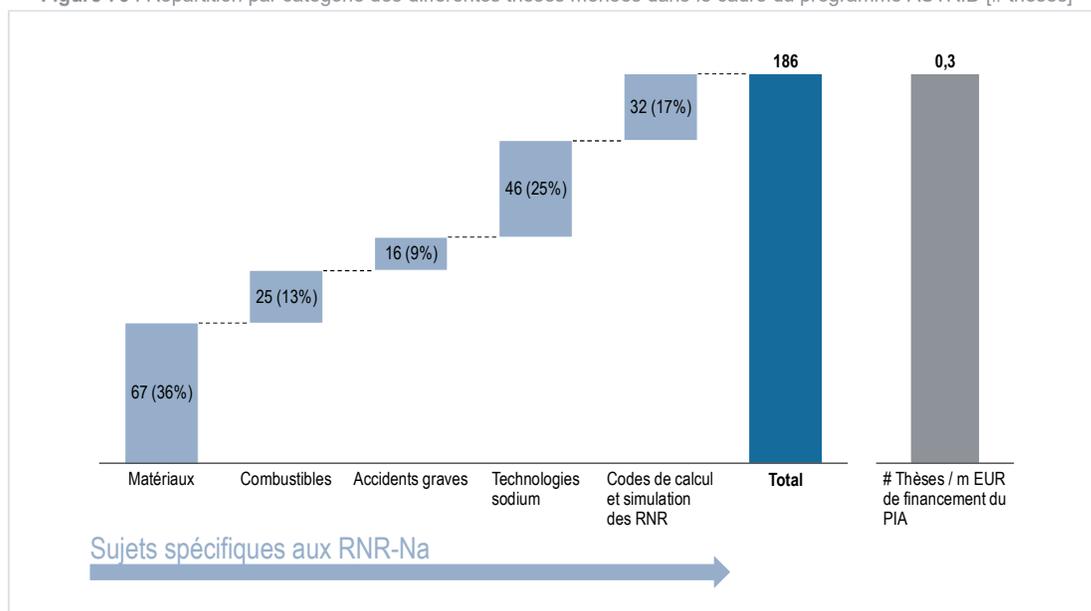
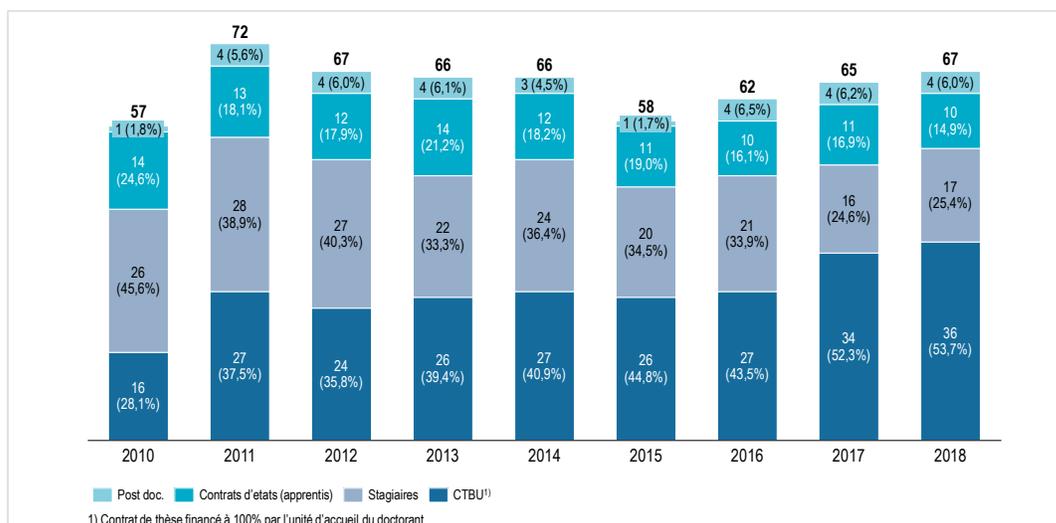


Figure 77 : Répartition par type de contrat des étudiants formés dans le cadre du programme [2010-2018, # contrats par année]



Près de 1.350 articles scientifiques générés pendant ASTRID

Le projet ASTRID a permis de générer de **nombreuses publications d'articles scientifiques**, à la fois dans des revues scientifiques mais également des conférences. Au total, **près de 1.350 publications** ont été effectuées en lien avec ASTRID entre début 2010 et le premier semestre 2019, dont **~88,5%** par le CEA seul, **9,9%** par le **CEA et un ou plusieurs de ses partenaires**, et enfin **1,6%** uniquement par un ou des partenaires.

Les **principaux partenaires du CEA pour la rédaction de ces articles** ont été : le **CNRS (16 articles)**, **Framatome (14 articles)**, le **KHT Royal Institute of Technology (9 articles)** et **EDF (7 articles)** – à eux quatre ces acteurs représentent **près de 30%** des publications que le CEA a rédigé en collaboration. Il est à noter que la **Cellule Projet ASTRID**, en plus de la **coordination de l'ensemble du programme**, fut également très active avec plus de 100 publications entre 2010 et 2019.

Figure 78 : Répartition des différentes publications effectuées dans le cadre du programme [# publications, 2010 - S1 2019]

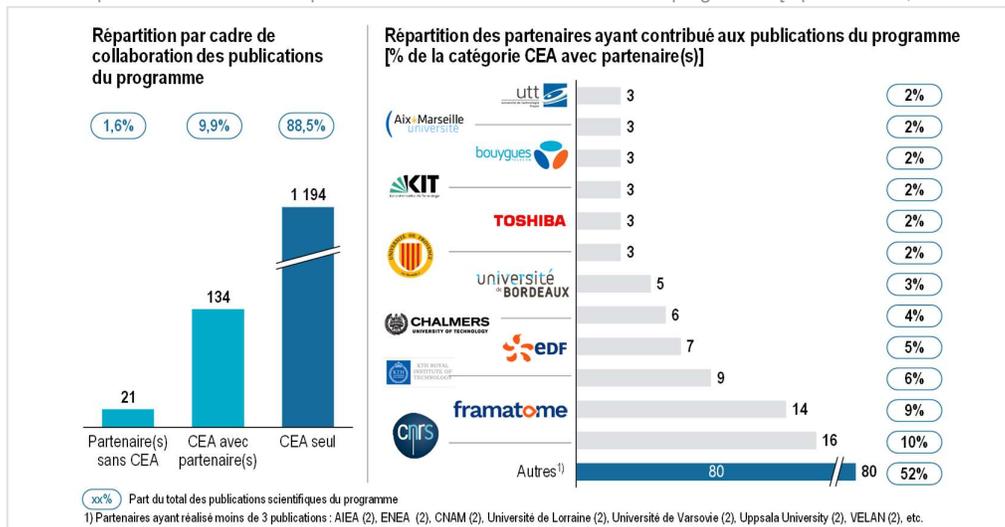


Figure 79 : Synthèse des différentes publications de la Cellule Projet ASTRID [2010-2019]

	 Conférence Internationale dédiée aux réacteurs nucléaires	 Conférence Internationale dédiée à l'instrumentation nucléaire	 Journal Scientifique à Comité de Lecture	 Global	 FR	 Autre (AIEA, SFEN, GEN4, ...)	Total
2010	1						1
2011	9	6	1				17
2012	1		2	1			3
2013	6						28
2014	2		1		22	1	2
2015	8		2			1	10
2016	8		1	1	14		10
2017	5						21
2018	6					3	6
2019	5						8
Total							106

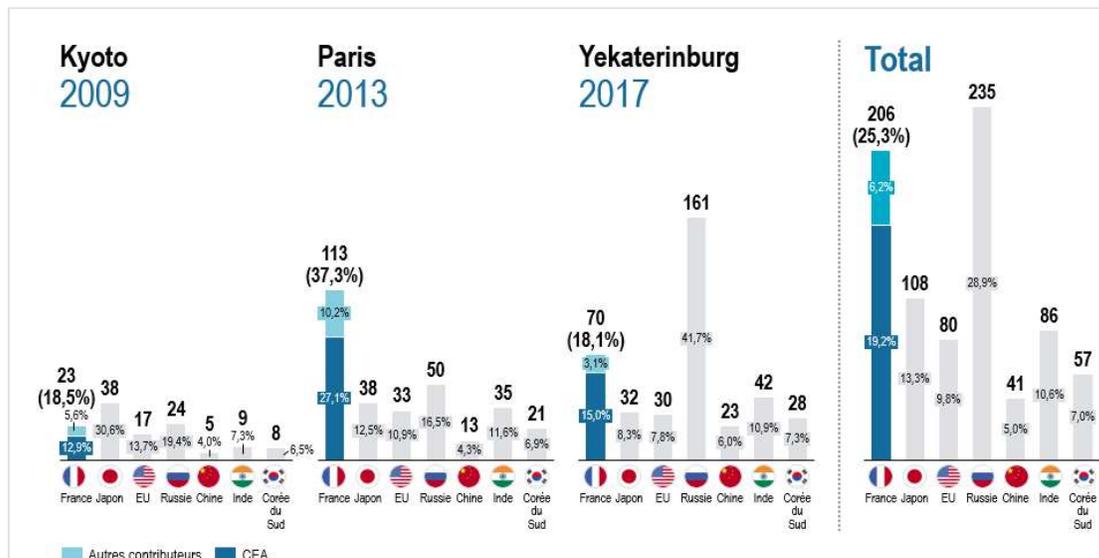
Forte montée de la visibilité de la France dans les congrès dédiés aux RNR-Na

Un seul congrès scientifique (nommé *Fast Reactors And Related Fuel Cycles conference*, ou congrès FR) est dédié spécifiquement aux problématiques propres aux RNR-Na. Cette conférence ayant lieu tous les 4 ans est donc le meilleur indicateur pour mesurer l'augmentation de la visibilité de la France à l'international sur cette thématique spécifique.

On observe tout au long du projet une montée du rôle de la France pendant ces congrès : ainsi, elle passe de 18,5% du total des publications avant le programme à près de 37,3% en 2013 pendant le pic de recherche lié au début d'ASTRID, pour ensuite redescendre à un niveau de 18,1%. Au total, notre pays se classe donc comme le second grand

acteur international sur cette thématique derrière la Russie, devant d'autres grandes puissances telles la Chine et les Etats-Unis.

Figure 80 : Répartition par pays des articles publiés dans le cadre des différents congrès FR



Diffusion des savoirs du programme via de la sous-traitance des travaux d'ingénierie par les partenaires
[Confidentiel]

Figure 81 : Liste des sous-traitants en ingénierie mobilisés par les partenaires du CEA

[Confidentiel]

3.3.5 Les technologies développées au cours d'ASTRID ont permis des avancées majeures en termes d'environnement et de santé, quoique s'inscrivant sur le long terme

Le programme a des impacts potentiels importants en termes d'environnement et de santé, à travers deux grands enjeux :

- Il a permis des **avancées importantes** sur le sujet de la conception et de la **sûreté nucléaire** pour les futurs **réacteurs 4G**, en particulier sur la gestion des accidents graves ;
- Les RNR-Na représentent à long terme une opportunité technologique majeure pour la **production d'énergie décarbonée**, et l'une des plus abouties pour le recyclage des matières issues du **traitement des combustibles usés**.

ASTRID a été à l'origine de la **redéfinition des grands objectifs de sûreté**, ainsi que de la **refonte des référentiels de sûreté** du nucléaire 4G. Ainsi, comme ce projet obligeait à revisiter les fondamentaux de sûreté à partir de la conception complète du design d'un réacteur, il représentait donc une occasion unique de baser ce design sur des **objectifs de sûreté très avancés**. Cette problématique fut au cœur de la conception d'ASTRID, avec des objectifs extrêmement ambitieux par rapport aux **standards des réacteurs de troisième génération** – vision exigeante conservée tout au long de la durée du projet. En détail, ce prototype avait pour objectif d'atteindre une nouvelle échelle de sûreté grâce aux **principaux types d'innovations** suivantes :

- Capacité de **gestion d'un accident grave du réacteur en autonomie** de 3 à 7 jours et limitation de la **portée des rejets** ;
- **Meilleure redondance des systèmes** au sein du réacteur et dans la centrale ;
- Conception de **systèmes de protection passifs**.

Les impacts suivants en lien avec la sûreté nucléaire ont été générés par le programme :

- Progrès importants en termes de **prévention** et de **gestion des accidents nucléaires** (fusion du cœur, rétention de produits de fission, etc.) ;
- Mise à jour du **référentiel de sûreté pour la conception de RNR**, dans le cadre de la réglementation française (actualisation du référentiel de SuperPhénix) – aboutissant à la rédaction complète d'un Dossier d'Orientations de Sûreté (DOs) soumis au Groupe Permanent de l'ASN ;
- Création de **nouveaux standards de sûreté plus aboutis pour la conception des réacteurs 4G**, en termes notamment de critères à prendre en compte, types de démonstration à prendre en compte, critères d'analyse. Ainsi, ce référentiel a notamment été appliqué au projet SAMOSAFER (développement de la démarche de sûreté à appliquer aux réacteurs à sel fondu MSR), ainsi qu'à la démarche de sûreté pour le RJH (réacteur Jules Horowitz) – qui s'inspire de celle mise en œuvre historiquement sur les RNR ;
- Application de **plusieurs évolutions** en termes de **sûreté** aux **réacteurs du parc 3G français** ;
- Echange avec **différents partenaires internationaux** pour améliorer les référentiels de sûreté de leurs projets de réacteurs avancés (cf. projet EPR en Angleterre) ;
- Développement des **technologies** et du **design** de **l'installation PLINIUS-2**, représentant une première mondiale avec l'atteinte de nouveaux standards pour les tests de sûreté pouvant y être effectués (cf. notamment **four innovants** pour tester les réactions du corium).

En particulier, les **principaux éléments de sûreté transposables aux réacteurs 3G** sont les suivants :

- En termes d'**approche de sûreté**, la prise en compte de l'**élimination pratique de situations à la conception** développée pendant ASTRID est généralisable aux REP ;
- En lien avec les **outils**, les **outils de calcul scientifique suivants** peuvent être réemployés :
 - **SCONE** : outil adaptable au cas REP ;
 - **SIMMER** : **code multiphasique-multi-matériaux** et méthodologie de chainage de dégradation du cœur du réacteur réemployables ;
 - **Europlexus** : codes de calcul de **comportements de structure en dynamique rapide** réutilisables ;
- Enfin, plusieurs **matériels et installations expérimentaux** en lien avec les installations d'ASTRID pourront être utilisés pour **améliorer le niveau de sûreté du parc 3G** :
 - **Four développé** pour l'installation PLINIUS-2 ;
 - **Microscope électronique pour l'analyse d'échantillons** de mélange de matériaux ayant été portés à haute température.

Par ailleurs, le programme a permis de réaliser des avancées importantes sur la conception des réacteurs RNR-Na, ces derniers offrant une **possibilité d'accélération de la production d'énergie décarbonée**, avec l'enjeu pour la France

d'atteindre **plusieurs siècles d'indépendance énergétique**. En effet, le programme ASTRID représente la possibilité d'accéder sur le long terme à une énergie nucléaire :

- Plus sûre que les réacteurs actuellement en exploitation ;
- Permettant de diminuer la production de déchets nucléaires de haute activité.

L'ensemble des partenaires – y compris ceux les moins ancrés sur les sujets du nucléaire civil (Technetics, Ariane Group, ...) – ont partagé la conviction que ce projet était une orientation **à suivre** face aux enjeux du **réchauffement climatique**. Ainsi, leur compréhension est que, dans le panorama actuel des technologies productrices d'énergie décarbonée, l'énergie nucléaire représente un **outil au service de la stratégie énergie-climat de la France** dont l'objectif est d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050.

3.3.6 Le programme ASTRID a permis une forte structuration non seulement de l'écosystème du CEA et du nucléaire français, mais aussi celui entre Etats sur le sujet du nucléaire 4G

Un des impacts majeurs du programme est d'avoir permis une **forte structuration des écosystèmes**, avec **trois échelles** devant être différenciées :

- Il a permis de **pérenniser un certain nombre de partenariat** entre le **CEA et d'autres acteurs** sur des sujets liés aux RNR ainsi qu'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 représenta ASTRID ;
- Enfin, il a **stimulé la collaboration inter-étatique** sur de nombreuses problématiques liées aux réacteurs 4G.

Tout d'abord pour le CEA, ASTRID a permis la **poursuite de la collaboration** en termes de **R&D** sur les RNR-Na avec les acteurs suivants : **EDF, Framatome, JAEA, JRC Karlsruhe** (institut de recherche sur les transuraniens), **Karlsruhe Institute of Technology** et **ENEA** (Agence nationale italienne pour les nouvelles technologies, l'énergie et le développement durable).

Des **coopérations durables** ont également été **établies / approfondies** avec les **partenaires** du programme et **certaines sous-traitants** de premier rang (comme ECM Technologies). La construction de ces relations de long terme est passée par 3 modalités :

- Une meilleure adéquation aux **appels d'offre** du CEA ;
- Différents **montages de projet** pour répondre à des problématiques spécifiques ;
- Une **collaboration en termes de R&D** qui s'est créée / renforcée sur différentes problématiques.

Les **liens entre les partenaires du programme** se sont également intensifiés, permettant de créer des synergies importantes entre ces acteurs (**transverses** en termes d'externalités) et facilitant leur collaboration sur d'autres projets, via **plusieurs leviers** :

- **Harmonisation** en termes de **standards** et de **normes techniques** (cf. outils de calcul scientifique). Ainsi, le programme a permis un alignement considérable : par exemple sur le sujet des OCS, les partenaires ont pu faire un **benchmark du fonctionnement** des outils distincts qu'ils employaient, puis **s'aligner en termes de standards** ;
- **Diffusion de nouvelles méthodologies** à l'ensemble des entreprises (revue souple de choix technologique, pilotage de projet à risque, etc.), avec une **mise en situation pratique pendant le projet** leur ayant permis de maîtriser ces compétences ;
- **Renforcement de la coopération entre industriels de la filière nucléaire et partenaires R&D**, ayant débouché sur des **thèses et projets de recherche spécifiques** qui se sont poursuivis après le programme (en particulier pour les acteurs de type PME / ETI, qui étaient moins familiers avec ce type de collaboration) ;
- **Création / enrichissement de liens de sous-traitance** entre plusieurs partenaires, qui se sont ensuite prolongés après ASTRID sur d'autres projets (par exemple **Technetics** pour **Velan**, ou le **CNIM** pour **Framatome**) ;
- **Intégration / reconnaissance** par les acteurs clés de la filière nucléaire civile pour les **nouveaux entrants** (notamment Ariane Group). Ces derniers soulignent que les relations nouées (au niveau des dirigeants comme

des équipes opérationnelles) ont ensuite débouché sur **plusieurs réponses en commun à des appels d'offre** d'autres projets (cf. **Ariane Group** et **Bouygues / ECM Technologies**) ;

- **Cohérence d'ensemble** donnée en termes de **stratégie**, grâce à sa mise sous-tension avec un projet de grande ampleur orienté vers la **préparation des prochaines étapes industrielles** de la filière nucléaire.

Enfin en termes de collaboration entre Etats, il est à noter que par suite de l'arrêt du programme, l'accord entre le **CEA**, **JAEA**, **Framatome**, **Mitsubishi Heavy Industries**, et **Mitsubishi FBR Systems** a été renouvelé pour 5 ans, avec une collaboration approfondie sur l'ensemble des sujets de R&D sur lesquels il peut exister des **complémentarités de compétences**.

De plus, ASTRID a débouché sur l'**harmonisation de nombreuses problématiques** liées au **nucléaire** entre la **France et le Japon** :

- Alignement en termes de **design de réacteurs** sur les RNR-Na ;
- Programme commun sur la **gestion des accidents graves** ;
- Partage de certains **outils de calcul et de validation** ;
- Mutualisation des moyens pour la **réalisation d'essais liés à la sûreté** entre JAEA et le CEA ;

Le programme a donc permis de **particulièrement bien structurer la relation franco-japonaise sur le sujet du nucléaire**, fournissant un exemple probant de **collaboration entre Etats** dans un contexte de baisse de leur capacité à développer de **manière autonome** des systèmes nucléaires. La convergence de choix industriels fut d'une ampleur suffisante pour aboutir à un document actant de la vision commune franco-japonaise sur les RNR-Na, conduisant à **renforcer les éléments de design** validés au cours du programme en leur donnant une **portée internationale**.

De plus, via les **efforts de la France** déployés sur ce **programme** et sur le **nucléaire 4G**, un accord de collaboration poussé fut signé avec les **Etats-Unis**, portant en particulier sur le **programme VTR**.

Enfin, des accords sont en **cours de discussion avec plusieurs pays**, à des degrés divers d'avancement à date d'écriture du rapport :

- Avec **l'Inde**, afin de collaborer sur des **études de sûreté** ;
- Avec **la Chine**, pour **valoriser une partie des acquis** du programme.

Figure 82 : Synthèse des retours des partenaires concernant l'impact d'ASTRID sur la structuration de leurs écosystèmes

