



RÉACTEURS À SEL FONDU

QUELLE INNOVATION ? & QUELS MOYENS NÉCESSAIRES ?

GUILLAUME CAMPIONI

CEA (DM2S – SACLAY)



EN COMPLÉMENT DE CE QUI A DÉJÀ ÉTÉ DIT...

■ Quelques notions sur les théories de l'innovation

Introduction « MSR : Journées Scientifiques de MASSY » 22/23 mars 2018

■ Focus sur 3 points :

- Accident par insertion de « sur-criticité prompte »
- Cycle du combustible : « *la triste vie d'un atome de Pu* »
- Voie de conception : *complexification* ou *simplification* ?

■ Quels moyens nécessaires à court termes pour relancer les RSF ?

■ Conclusion *sommaire*... et quelques précisions



INNOVATION : ... METTRE UN PEU DE PERSPECTIVE

■ Cadre actuel du nucléaire

→ des outils, des schémas de pensées, des structures (humaines, organisations), des codes, des repères, des manières de raisonner et de poser les problématiques, etc.

→ **Cadre lié au type de réacteurs** (... à combustible solide)

■ Dans ce cadre existant ... Quid des RSF ?

→ Fondés sur un concept physique (très) différent des réacteurs actuels.

→ Pour progresser :

Faire une « analyse technique » des RSF

+

Faire une « analyse de la technique » → **Mettre de la perspective**

Sans mise en perspective...

...Risque d'y être enfermé dans un cadre actuel... inapproprié



INNOVATION... QUID ?

Petite précision utile : Pas question ici d'éléments de type « marketing »...

- **L'innovation** : ensemble de théories qui étudient comment progressent les techniques et les objets qui nous entourent.
- **Objectif** : comprendre les ressorts des avancées technologiques qui façonnent notre monde... pour aider le développement.

REX « habituellement utilisé » : l'ensemble de la période industrielle.

Exemples concrets :

- Diligence → Train
- La voiture
- Les moyens de communication
- L'industrie des loisirs
- L'informatique
- Les moteurs (machine à vapeur, moteur à explosion, etc.)
- Etc.



■ 1- La notion de « **Dominant Design** » :

Tout ce qui définit un objet technologique : architecture (composants, modèles d'affaires,...), performances de l'objet et les compétences nécessaires à sa production (identifiées, structurées, problématiques majeures sont posées, etc.).

Par exemple le dominant design du smartphone : dimensions, écran tactile, des fonctionnalités (appel, messagerie,...), itinérance, accès à Internet, les réseaux de production, la taille du marché, les limitations, les compétences en électronique, informatique, etc. (donc pas QUE les caractéristiques physiques d'un objet)

■ 2- La notion « **d'innovation** » :

Par amélioration d'un composant, par création d'un nouveau procédé technique, par un nouvel assemblage de composants déjà existants, par un changement d'organisation, etc.

(Erreur commune : innovation = découverte technique majeure)

→ Possibilités multiples pour innover **mais... 2 types d'innovation.**



INNOVATION DE « SOUTIEN » OU DE « RUPTURE » ?

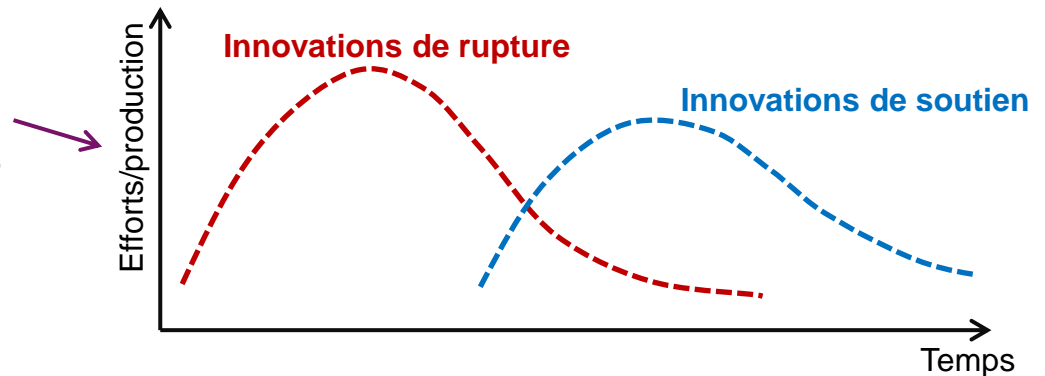
■ Innovation « de soutien »

Amélioration à la marge du « dominant design »
(soit sur l'objet en lui-même, soit sur la production de l'objet)

Exemples : mettre un appareil photo au smartphone, direction assistée d'une voiture, optimisation de la chaîne de production.

Dans le nucléaire : amélioration des barres de commandes de REP, optimisation du rechargement d'un réacteur, etc.

Différences de temporalités
dans la productivité et les efforts



■ Innovation « de rupture »

Création d'un nouveau dominant design ou sa modification profonde.

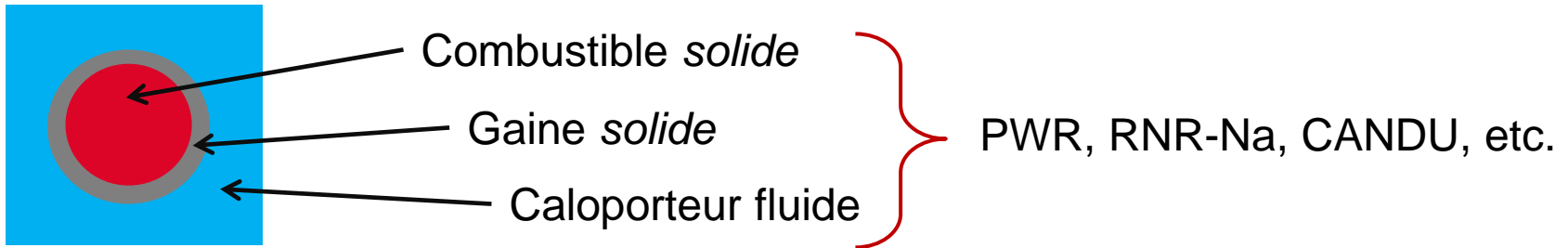
→ Très rarement une *invention technologique majeure*

→ **Repérable par les effets collatéraux** (impacts, conséquences et modifications des structures existantes, etc.)



LES RSF ET LE DOMINANT DESIGN NUCLÉAIRE

■ 3 éléments du dominant design actuel dans le nucléaire



■ RSF : Modification profonde

→ Seule filière GEN-IV en dehors du dominant design
Exemple d'impact : pulse sur-critique prompt

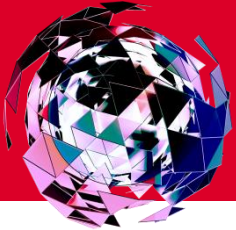
**Combustible +
Caloporteur fluide**
(pas de matériaux
de gaine)

Deux options possibles :

1- Un avatar, un hybride, une voie sans issue (cf. l'histoire de l'automobile)

2- Porteur d'une innovation « de rupture »

... avec les conséquences sur production, performances, possibilités, ...



INNOVATION : EXEMPLE DU NEW SPACE

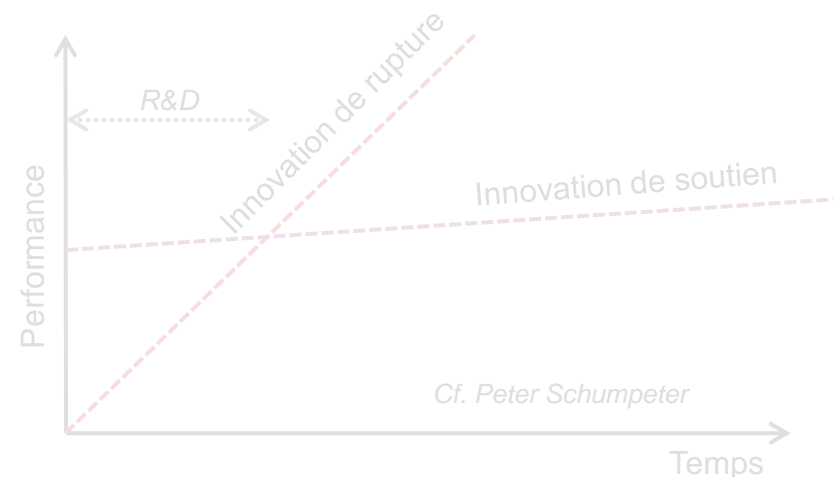
- **Pour étudier/penser/estimer les RSF (technique et potentiel)**
Condition → En dehors des schémas liés au « combustible solide »

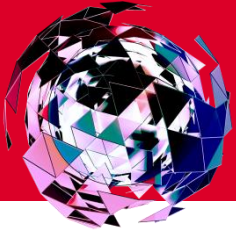
- **New space ...**

Atterrissage des boosters
de type « Falcon 9 »
(Lancement de la Falcon Heavy de Space X
le 6 février 2018)

Aspect « technique » de la
modification du dominant design :
Retour des lanceurs
→ Baisse du coût à l'espace : facteur 5 à 10.

→ **Très certainement une
innovation « de rupture »**





INNOVATION : EXEMPLE DU NEW SPACE

■ Pour étudier/penser/estimer les RSF

Condition → En dehors des schémas liés au « combustible solide »

■ New space ...

Atterrissage des boosters
de type « Falcon 9 »

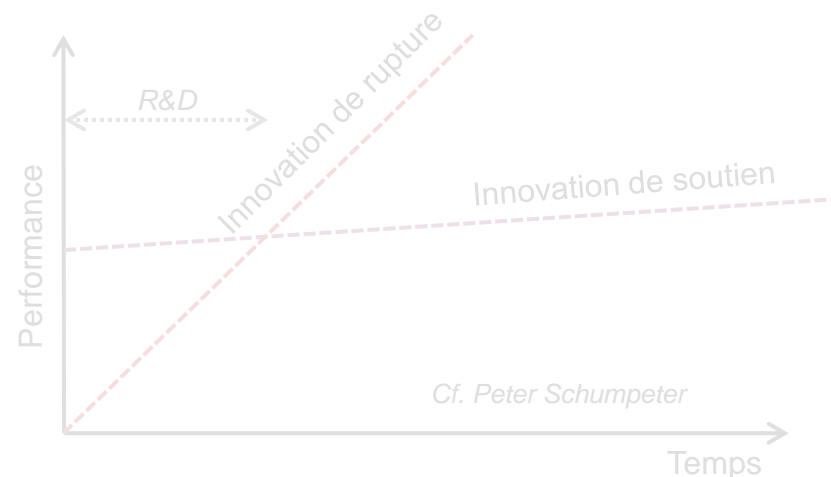
(Lancement de la Falcon Heavy de Space X
le 6 février 2018)

Aspect « technique » de la
modification du dominant design :

Retour des lanceurs

→ Baisse du coût à l'espace : facteur 5 à 10.

→ **Très certainement une
innovation « de rupture »**





INNOVATION : EXEMPLE DU NEW SPACE

■ Pour étudier/penser/estimer les RSF

Condition → En dehors des schémas liés au « combustible solide »

■ New space ...

Atterrissage des boosters
de type « Falcon 9 »

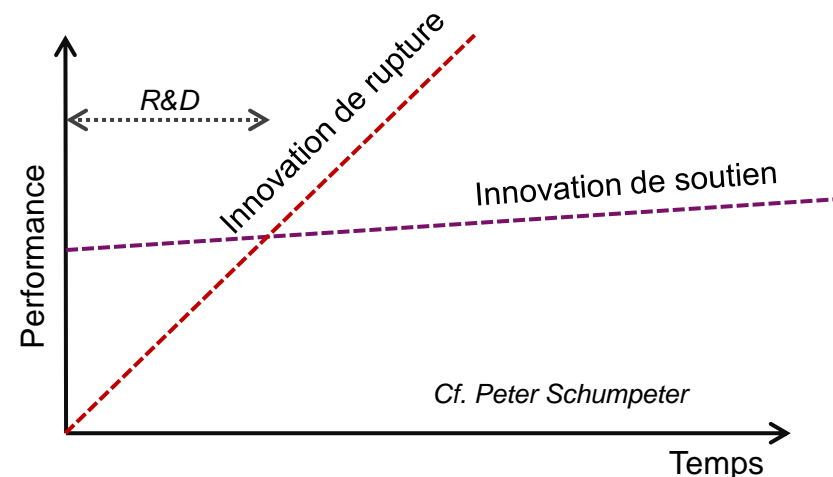
(Lancement de la Falcon Heavy de Space X
le 6 février 2018)

Aspect « technique » de la
modification du dominant design :

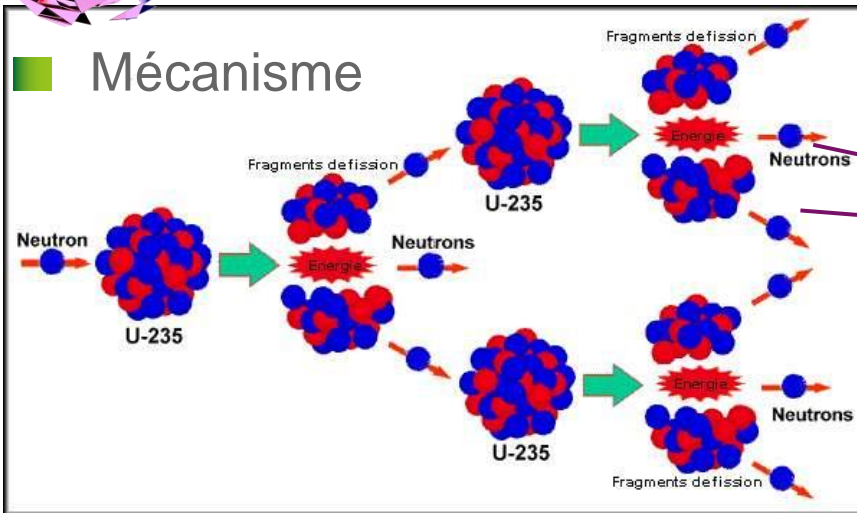
Retour des lanceurs

→ Baisse du coût à l'espace : facteur 5 à 10.

→ **Très certainement une
innovation « de rupture »**



FOCUS 1 : ACCIDENT DE SUR-CRITICITÉ PROMPTE



Neutrons émis =

→ neutrons **prompts** ($t \sim \mu s$)
→ + neutrons **retardés** ($t \sim 1 \text{ à } 20 \text{ s}$)

Neutrons retardés $\sim 0,00250 \%$! ($= 1 \beta_{\text{effectif}}$)

→ Pilotage du réacteur grâce à ces neutrons

Si les neutrons produits $> 100\%$ (pour la réaction en chaîne) + $1 \beta_{\text{effectif}}$

→ Plus besoin des neutrons retardés pour entretenir la réaction en chaîne
Régime sur-critique prompt (temps caractéristique $\sim \mu s$)

■ Une des problématiques centrales de la sûreté

→ Emballement de la réaction en chaîne

→ Augmentation de la production de chaleur



FOCUS 1 : ACCIDENT DE SUR-CRITICITÉ PROMPTE

■ Pour les réacteurs RNR à **combustible solide**

Échauffement du combustible (en quelques μs !)

→ Fonte des matériaux (gaine, assemblage) évaporation du caloporteur

→ Perte de la géométrie de fonctionnement
(plus de moyens de contrôle, plus de refroidissement)

→ Echauffement augmente

→ Fonte du cœur

Destruction du réacteur (→ Explosion ? Corium ? ...)
(Three Miles Island, Tchernobyl, Fukushima)

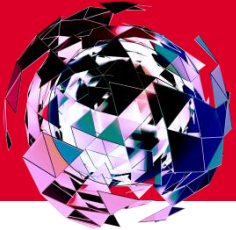
■ Pour un réacteur à **combustible liquide**

Échauffement du sel combustible

→ Dilatation du sel (pas de fonte du sel déjà liquide)

→ Plus de fuites de neutrons → Baisse de la réaction en chaîne

→ Nouvel équilibre entre température, fuites et nbr de fissions



FOCUS 1 : ACCIDENT DE SUR-CRITICITÉ PROMPTE

■ Pour les réacteurs RNR à combustible solide

Échauffement du combustible (en quelques μs !)

→ Fonte des matériaux (gaine, assemblage) évaporation du caloporteur

→ Perte de la géométrie de fonctionnement

(plus de moyens de contrôle, plus de refroidissement)

→ Échauffement augmente

→ Fonte du cœur

Destruction du réacteur (→ Explosion ? Corium ? ...)

(Three Miles Island, Tchernobyl, Fukushima)

■ Pour un réacteur à combustible liquide

Échauffement du sel combustible

→ Dilatation du sel (pas de fonte du sel déjà liquide)

→ Plus de fuites de neutrons → Baisse de la réaction en chaîne

→ **Nouvel équilibre entre température, fuites et nbr de fissions**



FOCUS 2 : VIE D'UN ATOME DE PLUTONIUM

■ Pourquoi « de plutonium » ? → Cycle U/Pu plutôt que Th/U

Elément fertile + neutron → Elément fissile

cycle Th/U → Thorium 232
cycle U/Pu → Uranium 238

Uranium 233
Plutonium 239

■ Avec un réacteur de RNR à **combustible solide**

Etapes : Déchargement du combustible, refroidissement en cœur, nettoyage de l'assemblage, transport de l'assemblage (camion), réception à l'usine de retraitement, stockage, découpage de l'assemblage, séparation métal/combustible, dissolution, extraction du Pu, de l'U et des PF, transport du Pu vers l'usine de fabrication du combustible, fabrication du combustible, fabrication de l'assemblage, transport vers le réacteur, chargement en réacteur, retour en irradiation de l'atome de Pu.

→ **Temps hors cœur ~ entre 10 et 15 ans**



FOCUS 2 : VIE D'UN ATOME DE PLUTONIUM

■ Avec un réacteur à **combustible liquide**

Étapes : Prélèvement de 40 litres de sel combustible par jour, retraitement du sel (séparation du Pu, de l'U et des PF), réinjection du sel dans le cœur.

→ **Temps hors cœur... entre 2 et 5 jours**

Le bilan ?!

- moins de matières consommées (métaux et autres)
- moins de consommation d'énergies (électricité, pétrole, etc.)
- moins de tâches à accomplir
- moins de logistique
- moins de transport routier
- moins de capital financier immobilisé
- moins de matériels et équipements nécessaires
- moins de personnes mobilisées
- moins de causes d'erreurs possibles
- etc.

→ **Plus simple !**



FOCUS 3 : COMPLEXIFICATION OU SIMPLIFICATION ?

■ Conception ... la voie actuelle...

Augmentation de nombre
de systèmes, des mesures,
des mécanismes, des
démarches, ...

→ Voie de complexification quasi-exponentielle

Augmentation de la mobilisation de matériel, d'êtres humains, de temps nécessaires à la réalisation (construction de l'EPR ?), des processus, etc.

Augmentation des coûts financiers !

→ Quelle valeur du rapport entre cet investissement et le gain final ?



FOCUS 3 : COMPLEXIFICATION OU SIMPLIFICATION ?

■ Conception ... la voie actuelle...

Augmentation de nombre de systèmes, des mesures, des mécanismes, des démarches, ...

Augmentation des dispositifs de contrôle, des mécanismes, des vérifications, des processus, des démarches, etc...



→ Voie de complexification quasi-exponentielle

Augmentation de la mobilisation de matériel, d'êtres humains, de temps nécessaires à la réalisation (construction de l'EPR ?), des processus, etc.

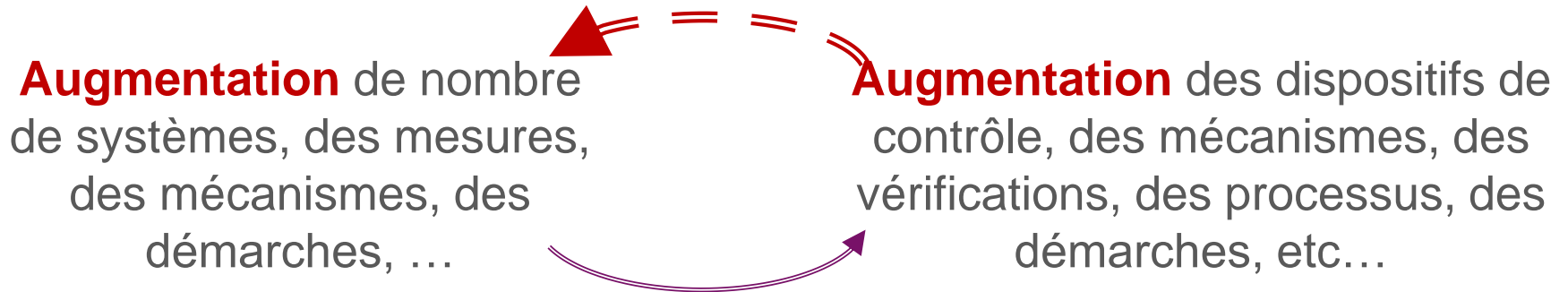
Augmentation des coûts financiers !

→ Quelle valeur du rapport entre cet investissement et le gain final ?



FOCUS 3 : COMPLEXIFICATION OU SIMPLIFICATION ?

■ Conception ... la voie actuelle...



→ Voie de complexification quasi-exponentielle

Augmentation de la mobilisation de matériel, d'êtres humains, de temps nécessaires à la réalisation (construction de l'EPR ?), des processus, etc.

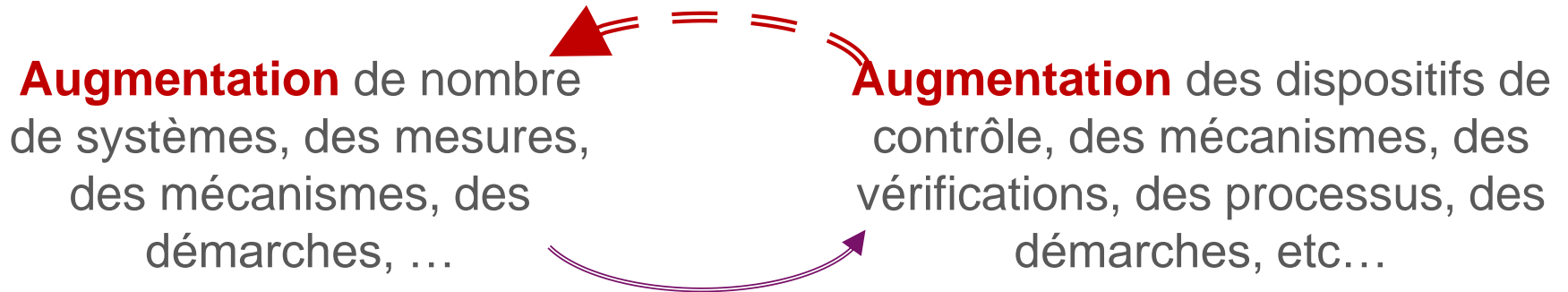
Augmentation des coûts financiers !

→ Quelle valeur du rapport entre cet investissement et le gain final ?



FOCUS 3 : COMPLEXIFICATION OU SIMPLIFICATION ?

■ Conception ... la voie actuelle...



→ Voie de complexification quasi-exponentielle

Augmentation de la mobilisation de matériel, d'êtres humains, de temps nécessaires à la réalisation (construction de l'EPR ?), des processus, etc.

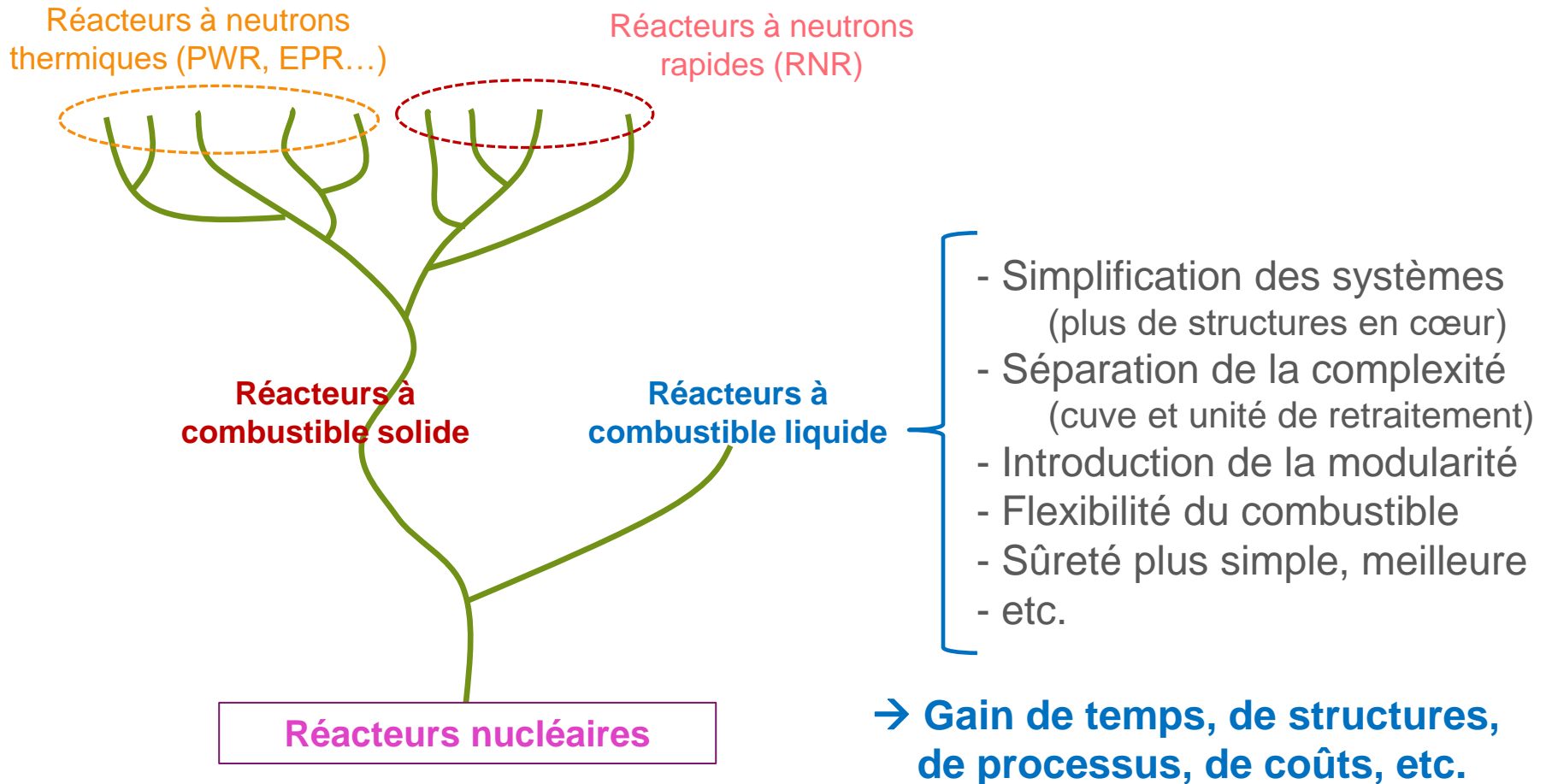
Augmentation des coûts financiers !

→ Quelle valeur du rapport entre cet investissement et le gain final ?



FOCUS 3 : COMPLEXIFICATION OU SIMPLIFICATION ?

■ Conception des RSF : un nouvel « embranchement » technologique





MOYENS NÉCESSAIRES À COURT TERME

■ Axes complémentaires à suivre pour monter en expertise

**Outils de calculs
et de simulations**
(adaptation à un
combustible liquide)

**Technologie
et conception des
systèmes**
Disposer de boucles à
sel fondu

Chimie
1- Matériaux
(corrosion)
2- Retraitement (Pu, U, PF...)
(unité du réacteur)

Etude de sûreté
Design de « réacteur
papier »



QUELLES CONCLUSIONS ? ... ET PRÉCISIONS

■ Quelles conclusions ?

Simplifications, sûreté intrinsèquement plus élevée, flexibilité du combustible, suivi du réseau (et des ENR), économie de coûts, etc.

→ **Questions** : Où est-ce que ça bloque ?
...Et pour quelles raisons ? (peur d'innover ? doc sur ARTE ?)

■ Éléments de contexte

- Date de déploiement des RNR-Na (selon EDF) : ~ années 2080
... contexte plutôt ouvert, non ?!

- Les 22/23 mars 2018 : « MSR : Journées scientifiques de MASSY »

CEA, IRSN, EDF, ORANO, FRAMATOME, CNRS, CNE + indépendants
(sortie du rapport avant fin juin 2018)

Indication : date de décision de lancer ce séminaire : lundi 4 décembre 2017

→ ...Virage des mentalités ?!

Merci de votre attention !

