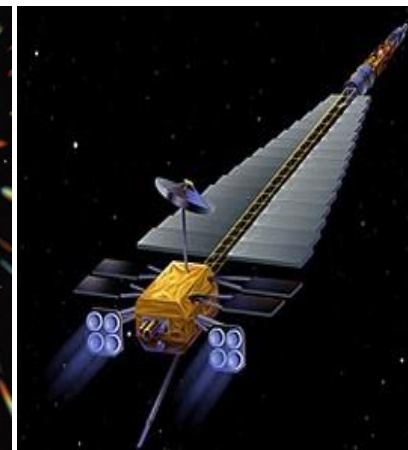
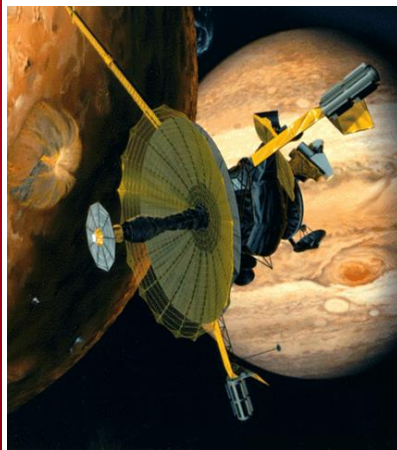


DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



LE NUCLÉAIRE ET LA CONQUÊTE SPATIALE



SFEN PACA | Xavier Raepsaet

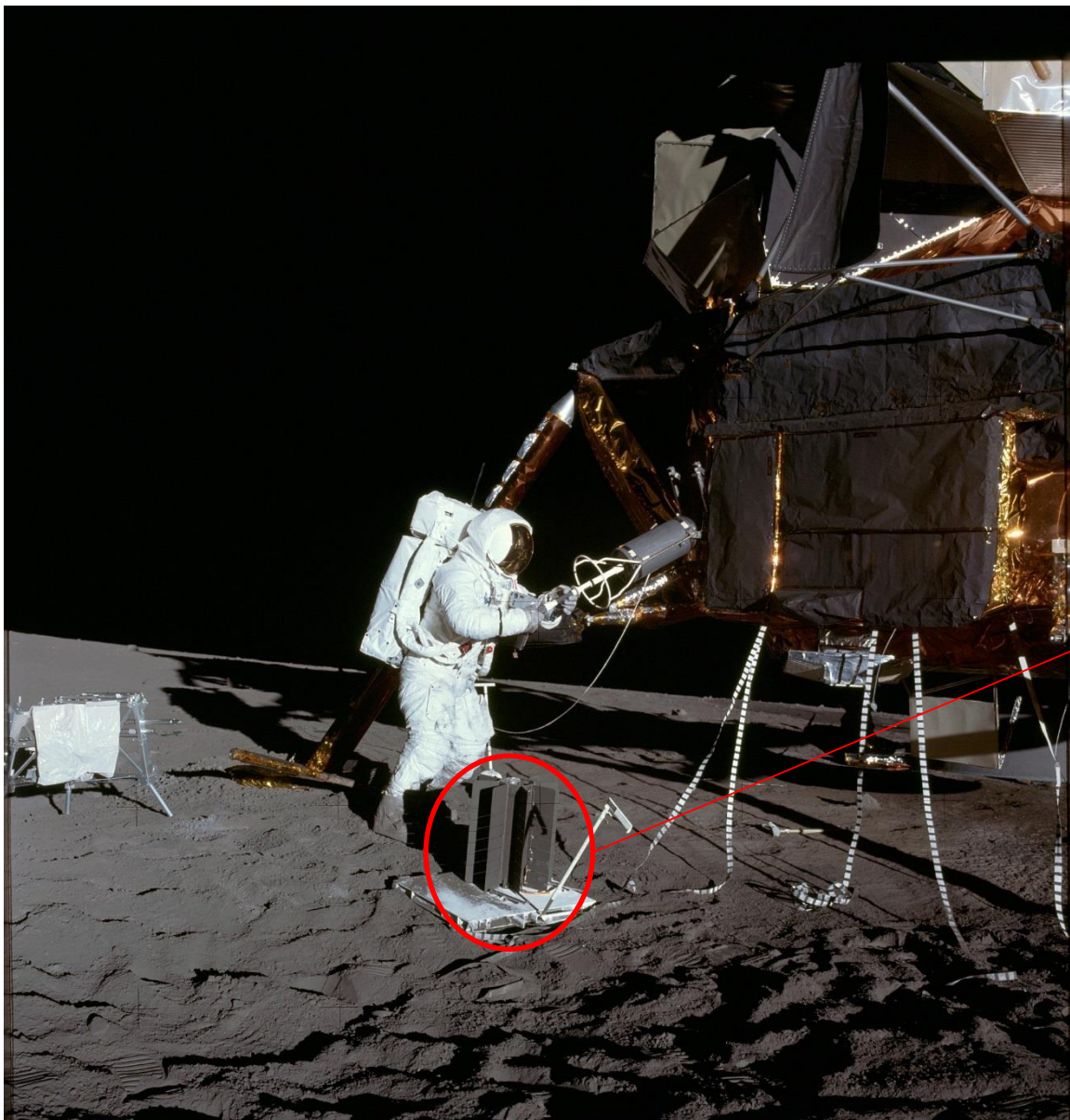
www.cea.fr

AIX-EN-PROVENCE

20 AVRIL 2018

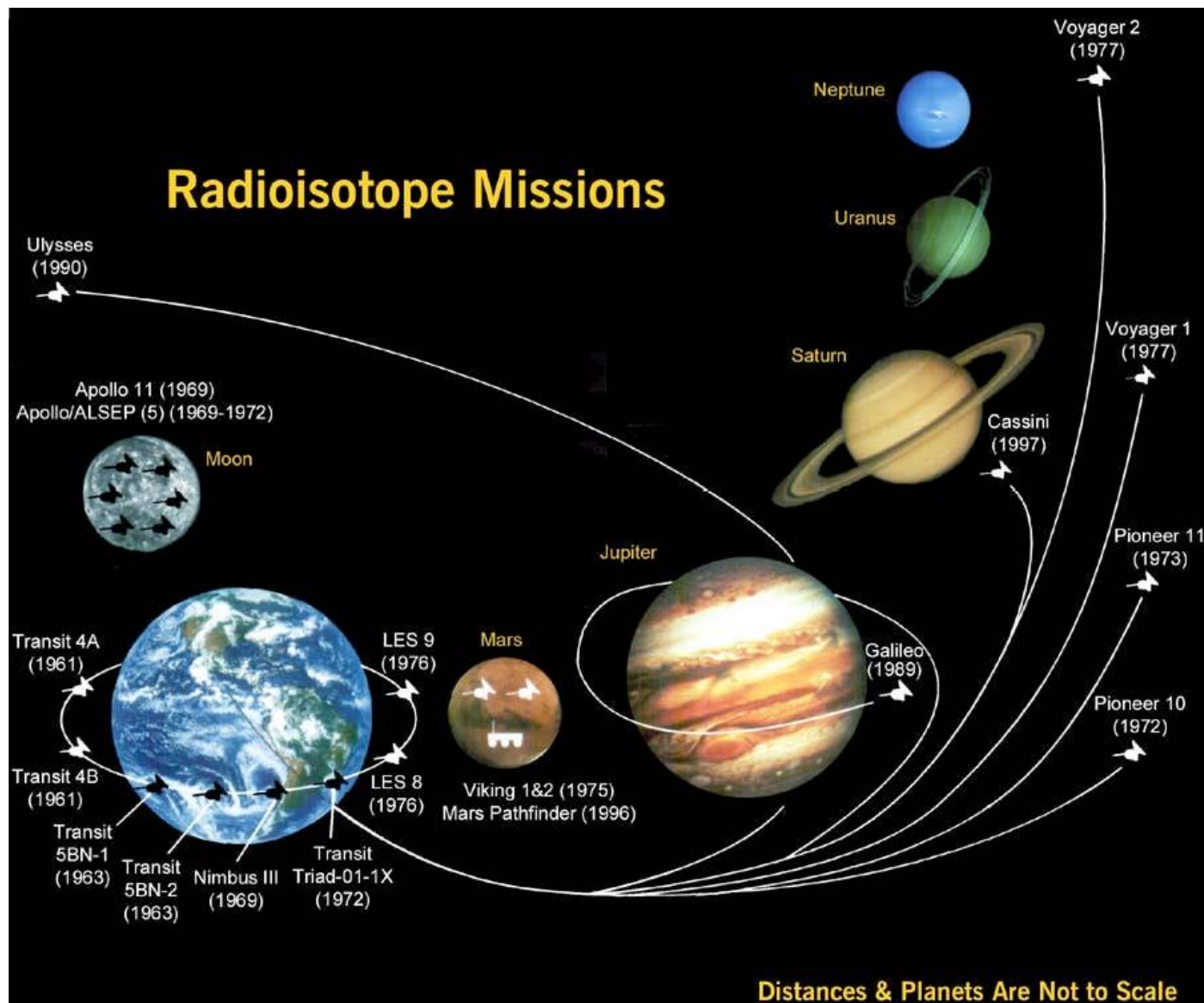
LE NUCLÉAIRE POUR L'ESPACE, UNE RÉALITÉ

MISSION APOLLO 12 !!



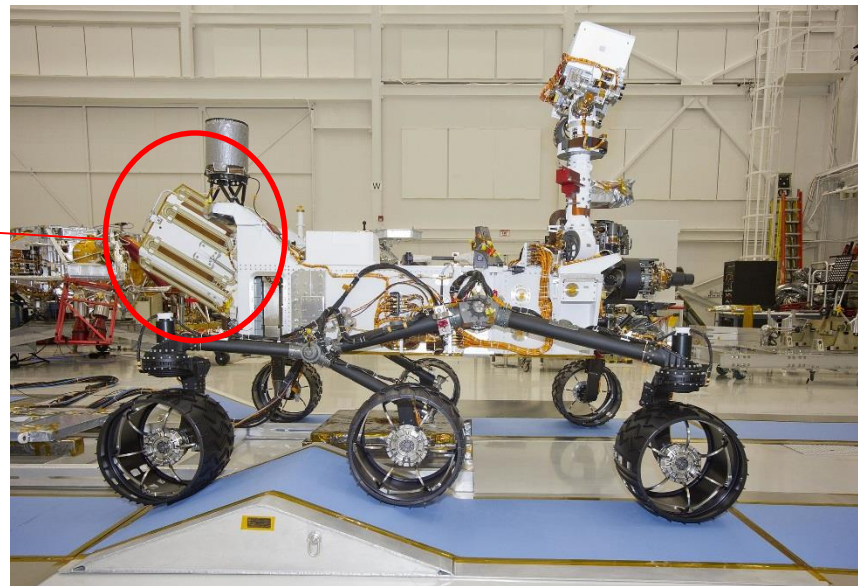
■ Utilisation de
générateurs
radio
isotopique
(RTG) au
plutonium 238

BIEN D'AUTRES MISSIONS...



ET PLUS RÉCEMMENT

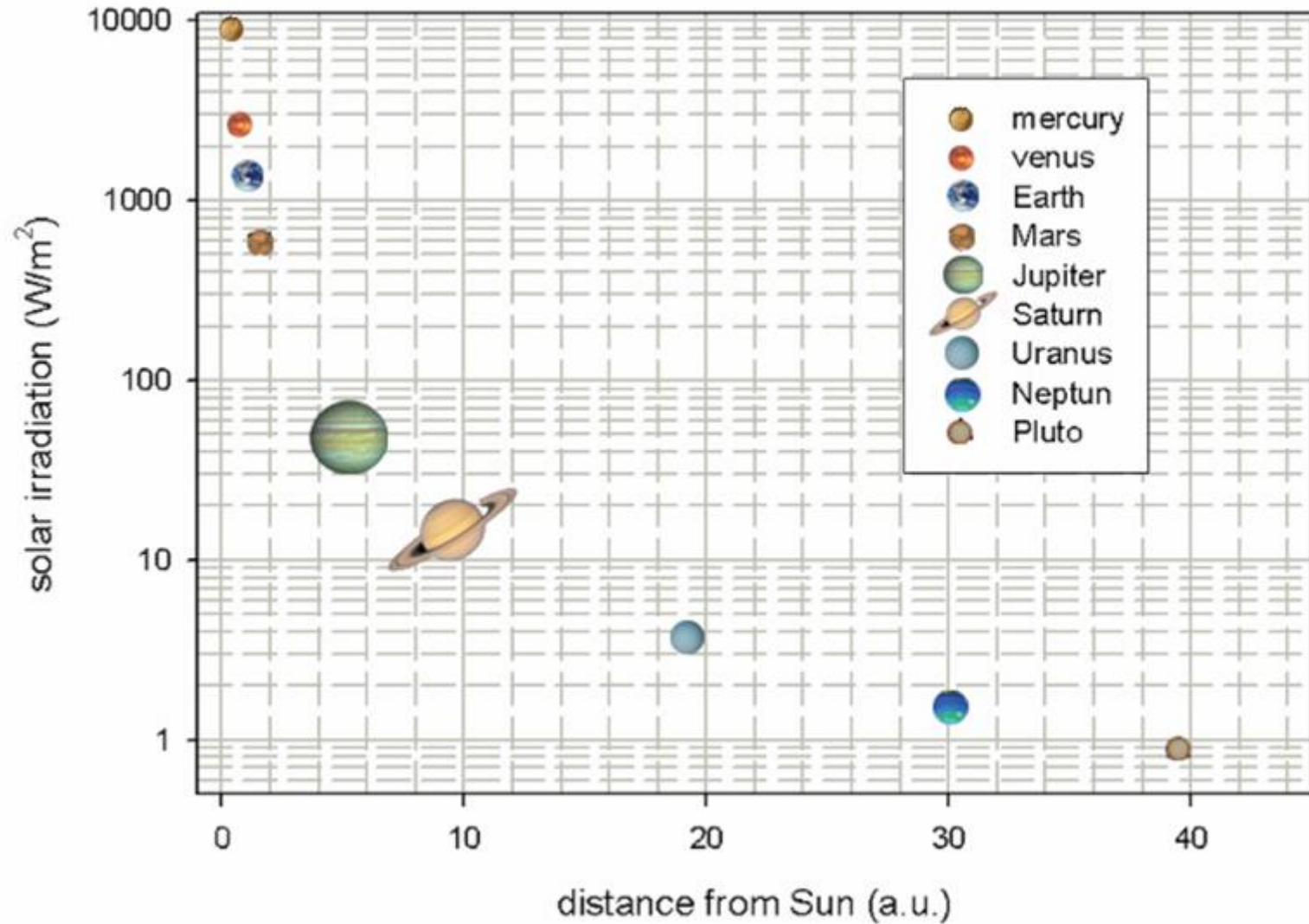
- Le rover martien *Curiosity* lancé en 2011
 - 4,8 kg de Pu pour 120 We
- Mission *New Horizons* vers Pluton et la ceinture de Kuiper lancé 2006



*Vue d'artiste de
l'arrivée sur Pluton
en 2015*

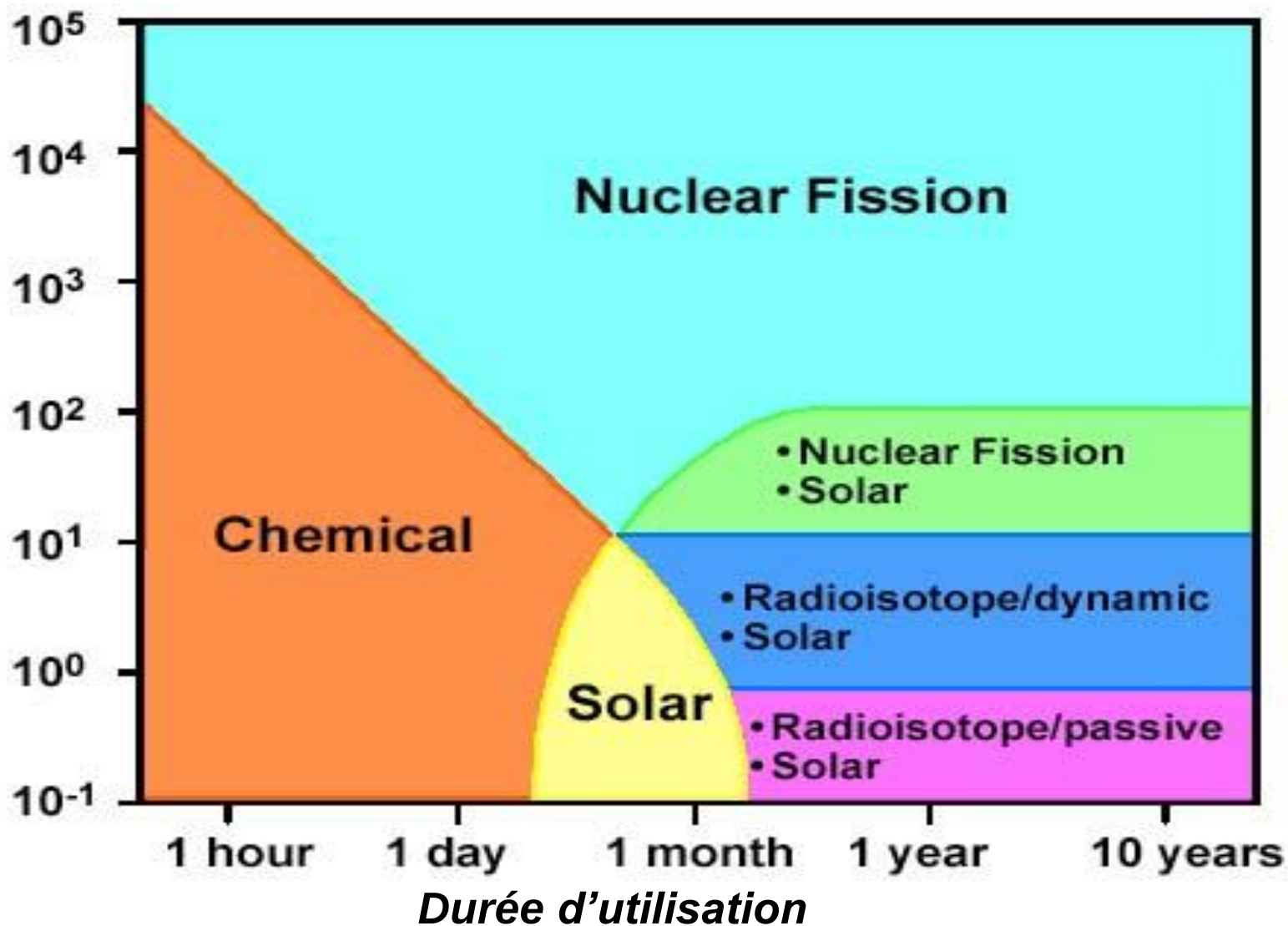
LE NUCLÉAIRE, POURQUOI ?

LE RAYONNEMENT SOLAIRE



LES ATOUTS DU NUCLEAIRE

Niveau de puissance électrique (kilowatts, kW_e)



Missions planétaires automatiques

- Missions complexes et énergétiques (ΔV), au delà de Jupiter

Systèmes de puissance en surface de planète

- Science mobile, exploration, creuser !
- Station habitée, ISPP, ...

Propulsion haute performance pour du transport habité

- Mars, Mars à partir de base lunaire, ...

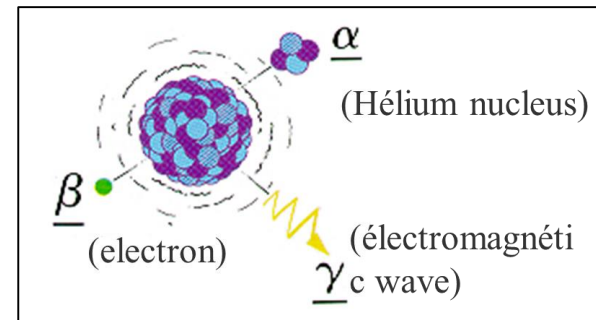
LES DIFFÉRENTS SYSTÈMES NUCLÉAIRES POUR L'ESPACE

QUELLE ÉNERGIE NUCLÉAIRE ?

Décroissance radioactive de noyaux lourds

pour :

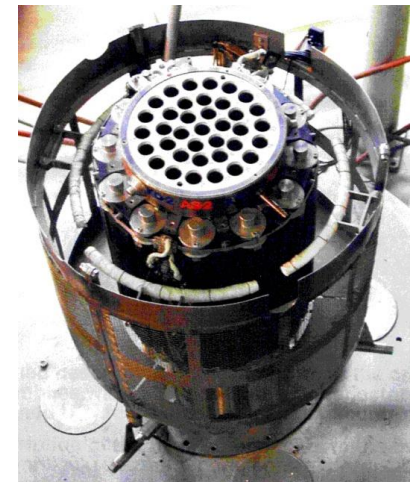
- Le chauffage de composants
- La production d'électricité



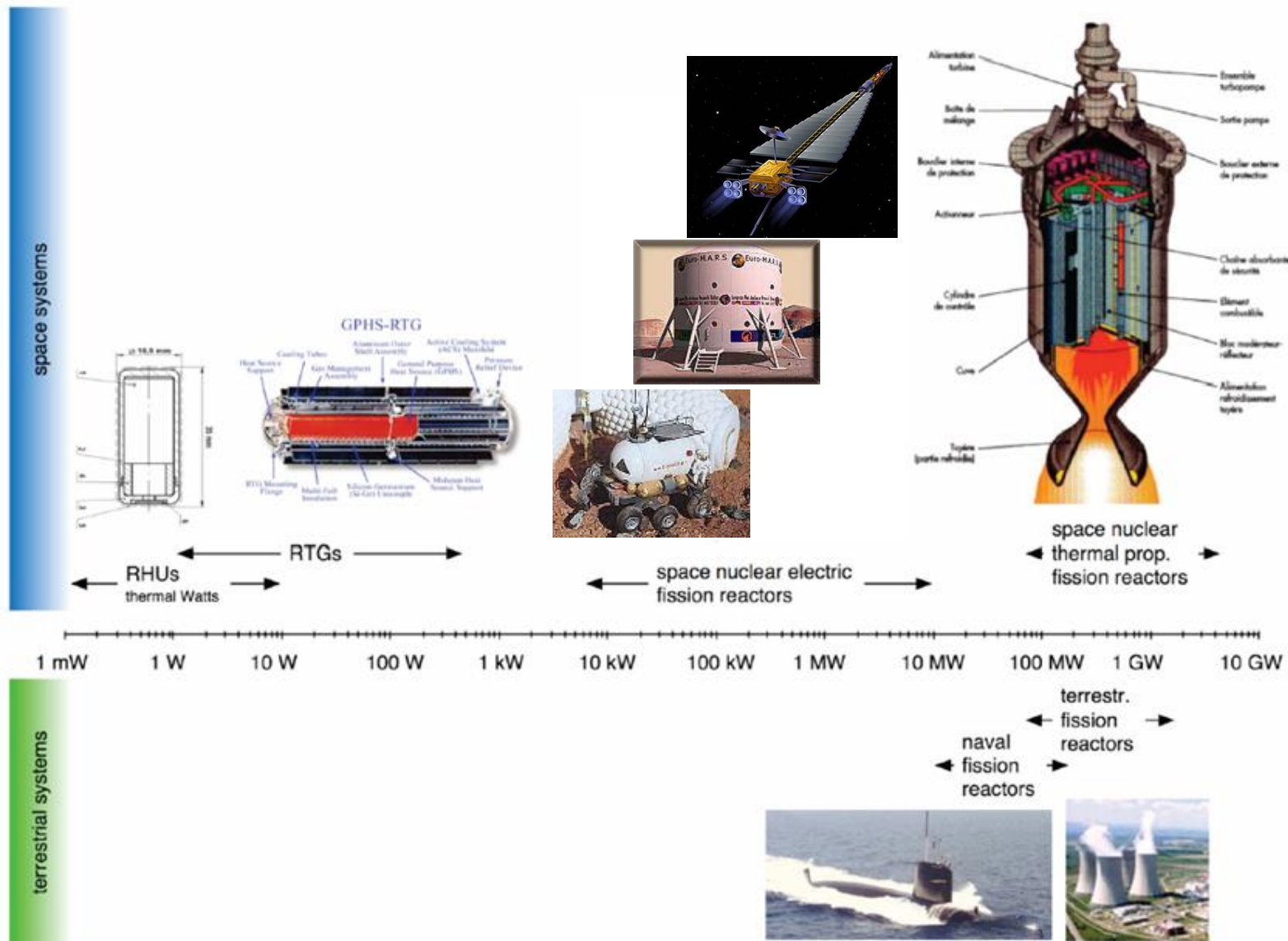
La fission, le réacteur nucléaire

pour :

- La production d'électricité
- La propulsion



LA GAMME DE PUISSANCE



LES GÉNÉRATEURS RADIO ISOTOPIQUES (RTG)



RTG

RHU, une "chauffrette"

- Quelques grammes de Pu et jusqu'à 40 W_{th}

RTG, générateur électrique

- Utilise la décroissance du ^{238}Pu
 - Période radioactive : $\sim 88 \text{ ans}$
 - Densité de puissance : $\sim 500 \text{ W/kg}$
- Conversion with thermo-element (**static**)
 - $10 \text{ to } 100 \text{ W}_e$
- La conversion **dynamique** est envisagée (DIPS)
 - $\sim 1 \text{ kW}_e$

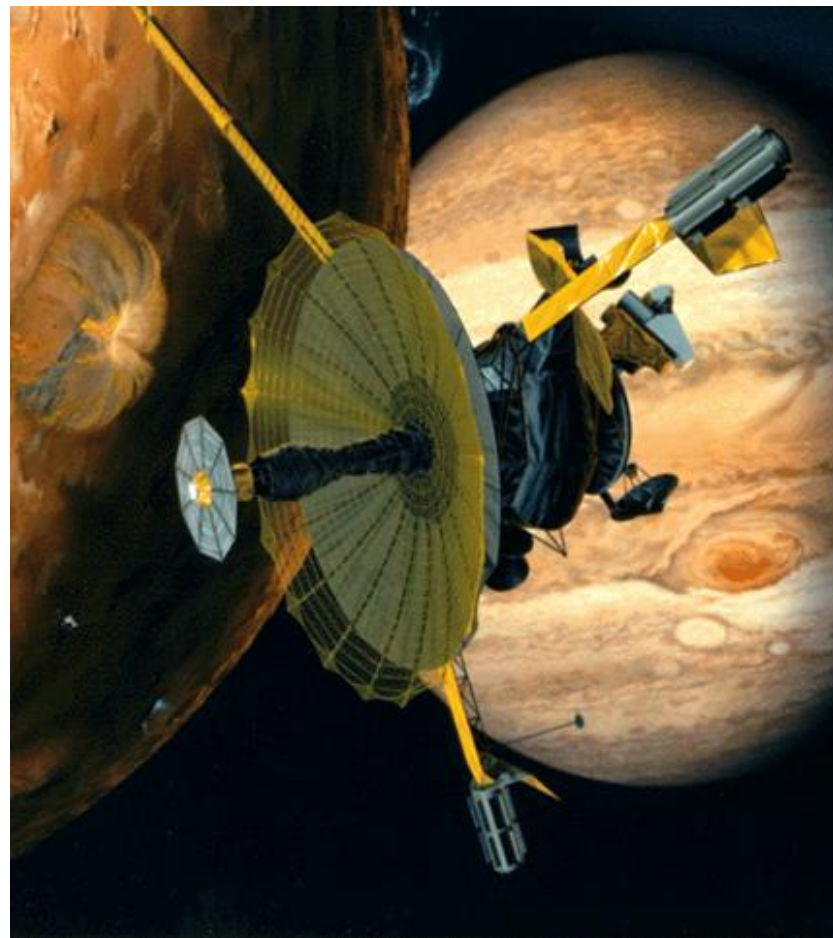
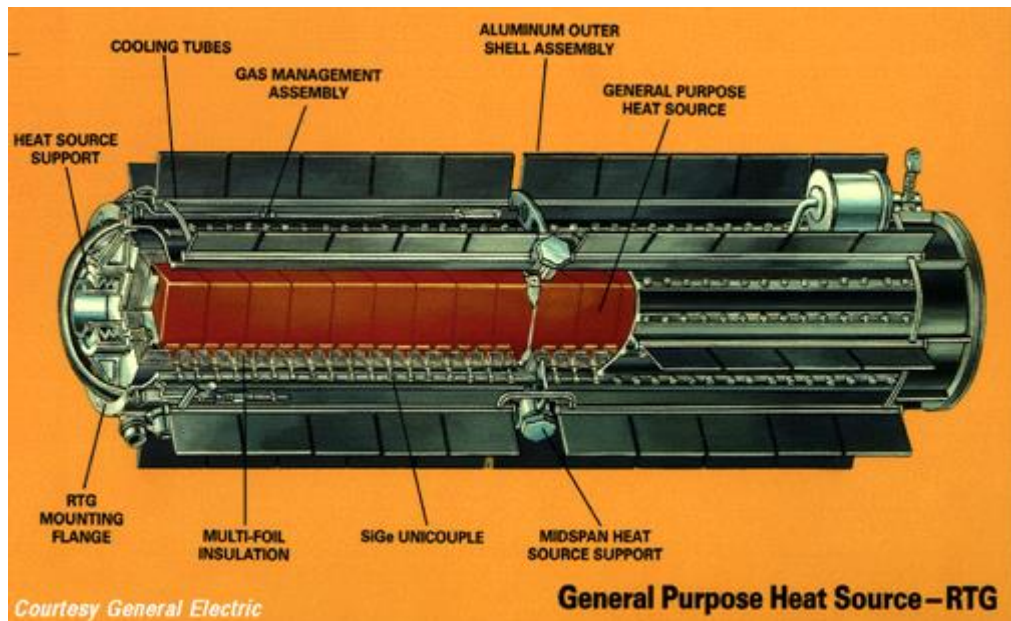
LES MISSIONS CONNUES DES RTG

APOLLO, ULYSSES, GALILEO (89), CASSINI (97)...

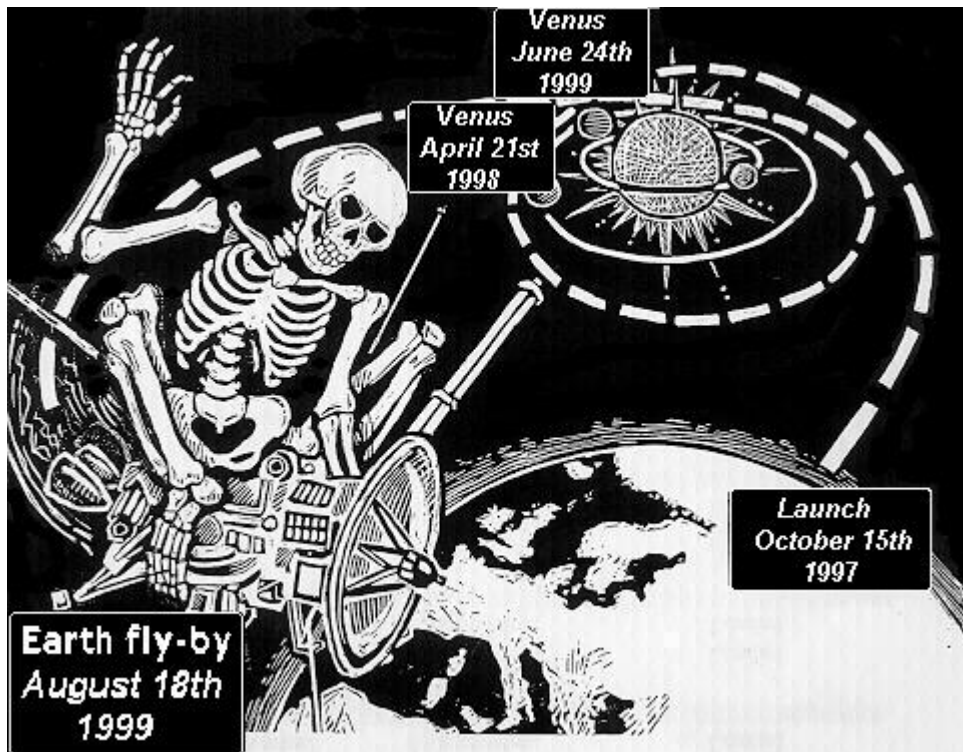
- CASSINI ~ 500 kilo-Curie sur le pas de tir !

Technologies

- **Monopôle US**, Russie mais sans utilisation



RTG souvent utilise mais pas toujours bien accepté !!



L'ÉNERGIE DU RÉACTEUR NUCLÉAIRE

LE RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Générateur électrique

Base planétaire
Satellite, Sonde
Vaisseau...



Propulsion
électrique



NEP



Propulsion nucléaire thermique

NTP

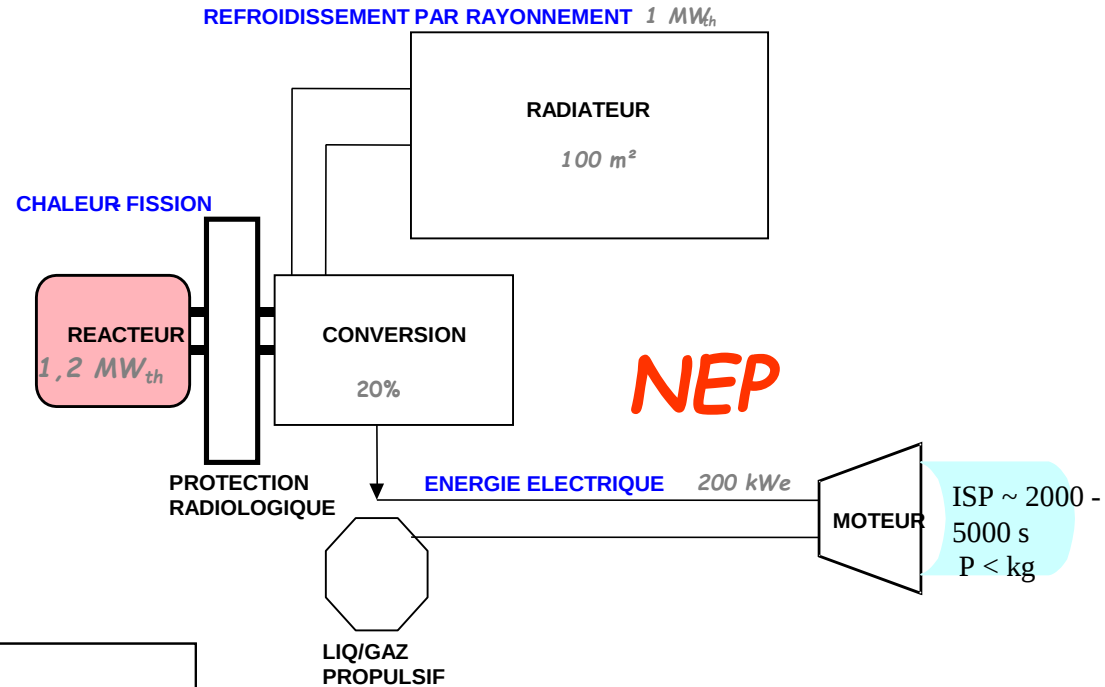


Deux modes de propulsion nucléaire

LES ARCHITECTURES

■ Même sans radiateur, la masse sèche du système **NTP** (propulsion directe) reste importante

NTP



LES RÉACTEURS

NUCLÉAIRES

LA GÉNÉRATION D'ÉLECTRICITÉ

LA PROBLEMATIQUE DU GÉNÉRATEUR ÉLECTRIQUE

$$\varepsilon \sigma S_{rad} T_f^4 = \frac{1-\eta}{\eta} W_e$$

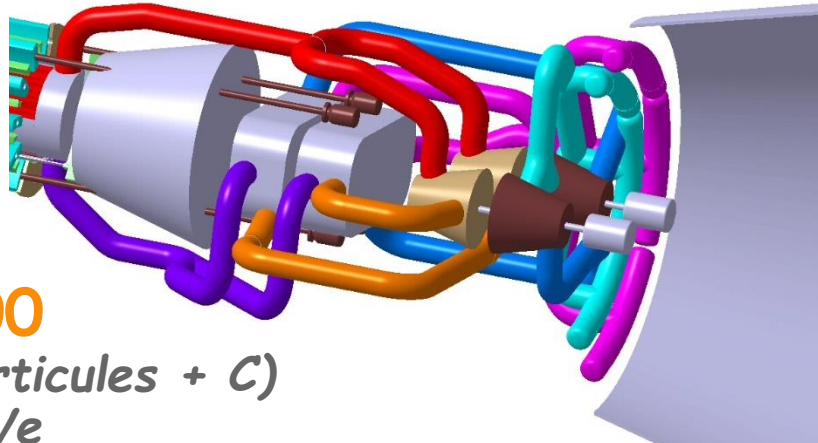
$$S_{rad} = \frac{1}{\varepsilon \sigma} \frac{W_e}{T_f^3 (T_{ch} - T_f)}$$

- Minimum pour $T_f = \frac{3}{4} T_{ch}$ soit $\eta = 25 \%$
- T_f requise assez élevée
 - Exemple $\varepsilon = 0.6$, 800 K moyenne → 14 kW/m^2
- T_{ch} élevée

Quelques centaines kWe (20 %) → 1 MW_{th} ray. → 100 m^2
TEMPÉRATURE SORTIE CŒUR ~ $1000 \text{ }^\circ\text{C}$

EXEMPLE DE DESIGN RÉALISÉ AU CEA

Réacteur à gaz + Brayton

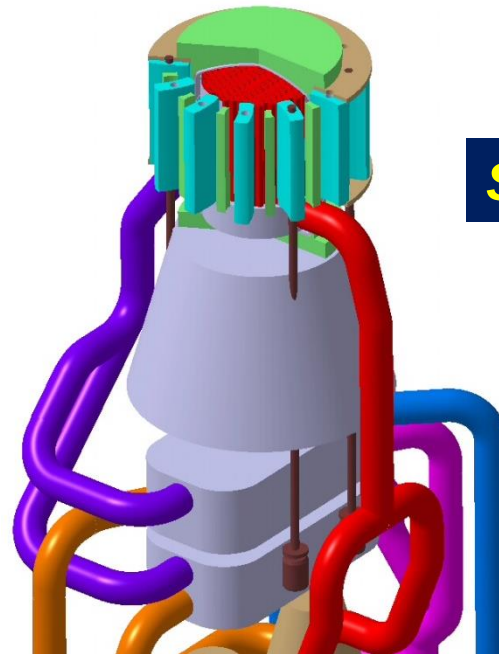


■ Projet **Opus-100**

- Combustible (particules + C)
- 2400 kg, 100kWe
($\alpha = 24 \text{ kg/kWe}$)

- A court terme :
adéquation technologies
**/lanceur/réacteur/
propulseur/**
➔ 120 kWe max.

- A moyen terme :
 - 500 kWe avec $\alpha \searrow$ mais
 - Limiter par la technologie combustible (fluence)



$$S_{ray} = 80 \text{ m}^2$$



Éléments clés pour le dimensionnement : le couple *système de conversion / concept cœur*

Le cœur du réacteur

- Durée de vie : ~ **7-10 ans**
- Souci de compacité/masse
→ réacteur de petite taille
 - Uranium très enrichi:
93 % ^{235}U
 - Quelques dizaines de kW/litre
 - Caloporteur : métal liquide ou gaz

Conversion statique ou dynamique

- Brayton, Stirling, Rankine
- Thermoionique, thermoélément, (thermoacoustique, MHD,...)

LE CONCEPT DE CŒUR (1/2)

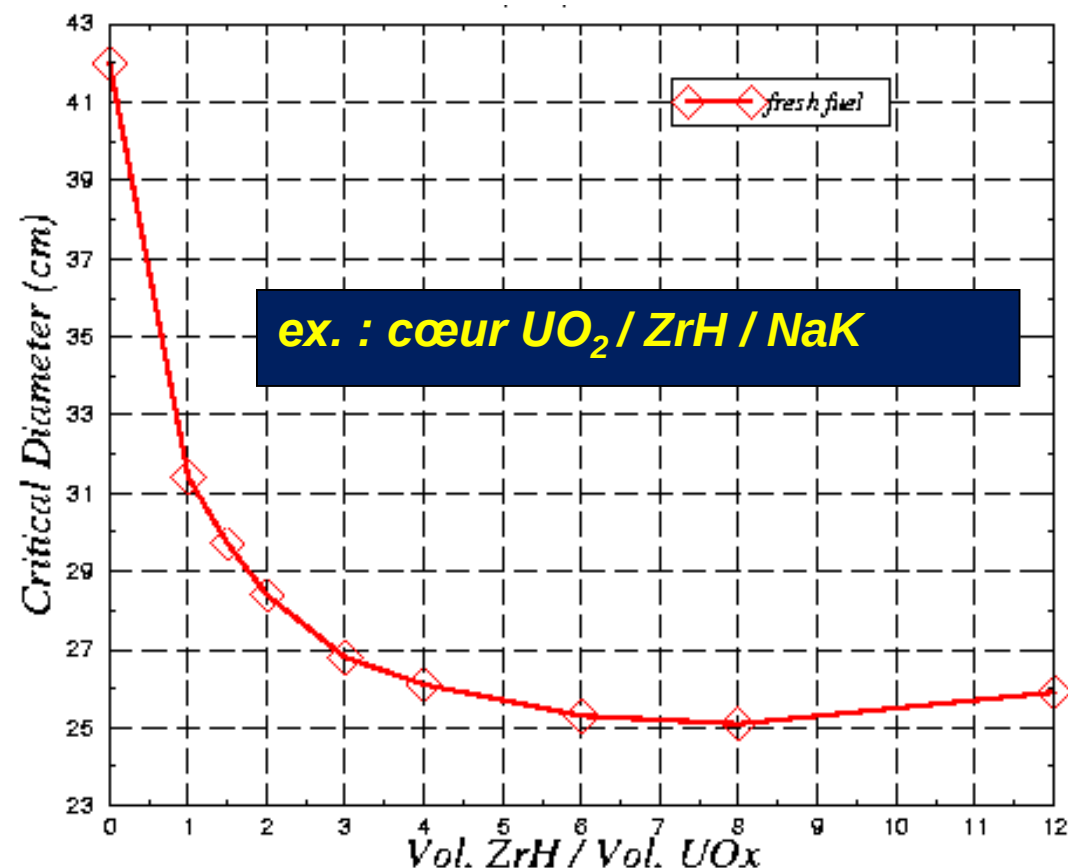
Gain sur la taille (masse) du réacteur
si modération efficace des neutrons

■ modérateur = atomes
légers → matériaux
hydrogénés : (H_2O , LiH ,
 ZrH , ...) voir Be

■ Réacteurs à neutrons
thermiques favorables



**Maîtrise des
températures
du modérateur**



Cas des fortes puissance (> 500 kWe)

- La limitation de la **taille du radiateur** implique la course à la **haute température**
- La **haute température** implique des matériaux réfractaires (base C, ...) = mauvais modérateur
- Réacteurs à neutrons rapides favorables

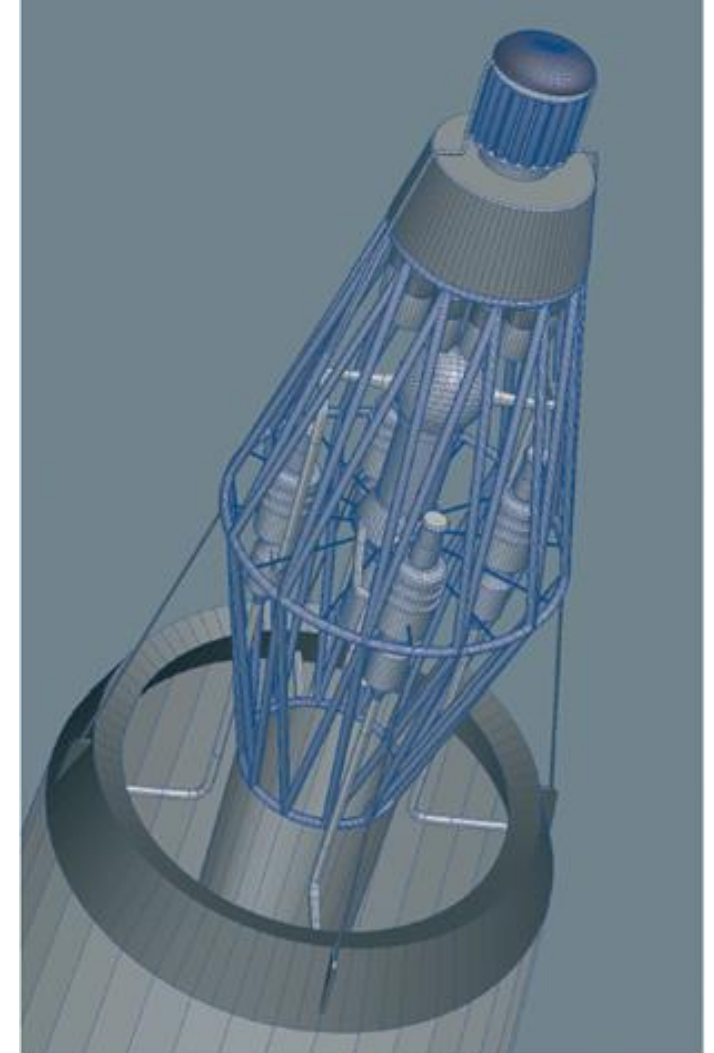
LE PROJET *ERATO* (1982-89)

1982-89 : dans un
cadre CNES-CEA-
DGA

- Avec participation d'industriels (SAGEM, TURBOMECA, NOVATOM, ...)

Deux versions :

- 200 kW_e et 20 kW_e

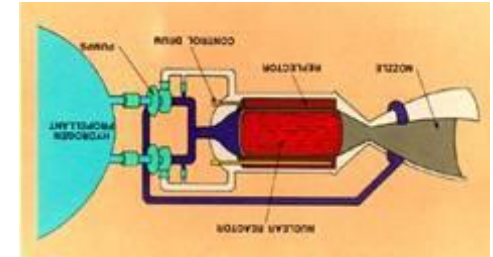


LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES

LA PROPULSION DIRECTE

LA PROBLEMATIQUE DE LA PROPULSION DIRECTE

$$H + \frac{V^2}{2} = cte \Leftrightarrow \frac{c}{\gamma - 1} + \frac{V^2}{2} = cte \quad c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$



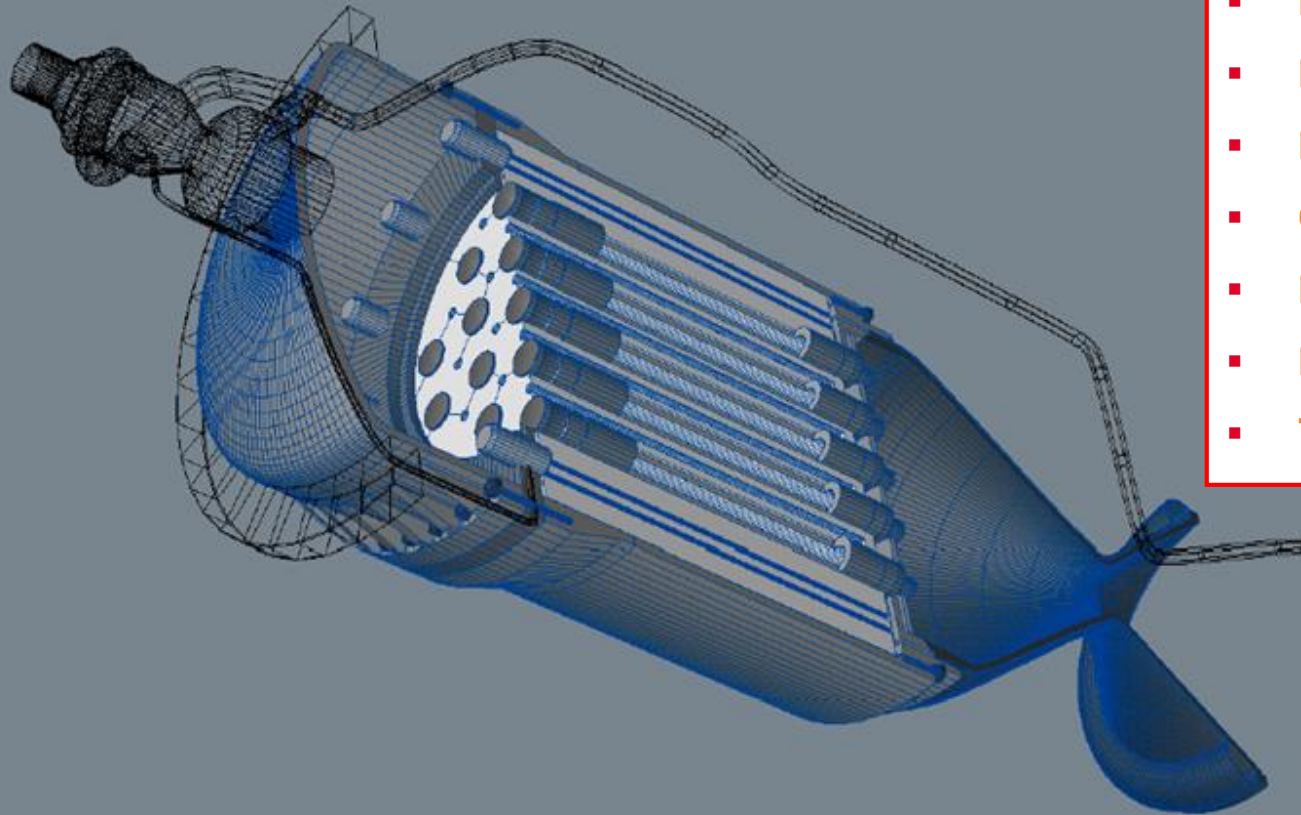
$$V_{eject} = \sqrt{2 \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{R}{M} T_0}$$

- Recours à H_2
- Températures très élevées
➤ 2000 - 3000 K
- Durée de fonctionnement courte
- Faibles taux de combustion
- Montées en température rapides
- Souci de compacité/masse
- Forte densité de puissance cœur nucléaire
(1 à 10 MW/litre)

Exemple 10 tonnes de poussée → 450 MW_{th} pour chauffer 14 kg/s d'hydrogène à 2200 K

Programme CEA - CNES (1995-97)

- Repose sur des technologies à court terme
- Dimensionnement, évaluation des performances, de la sûreté

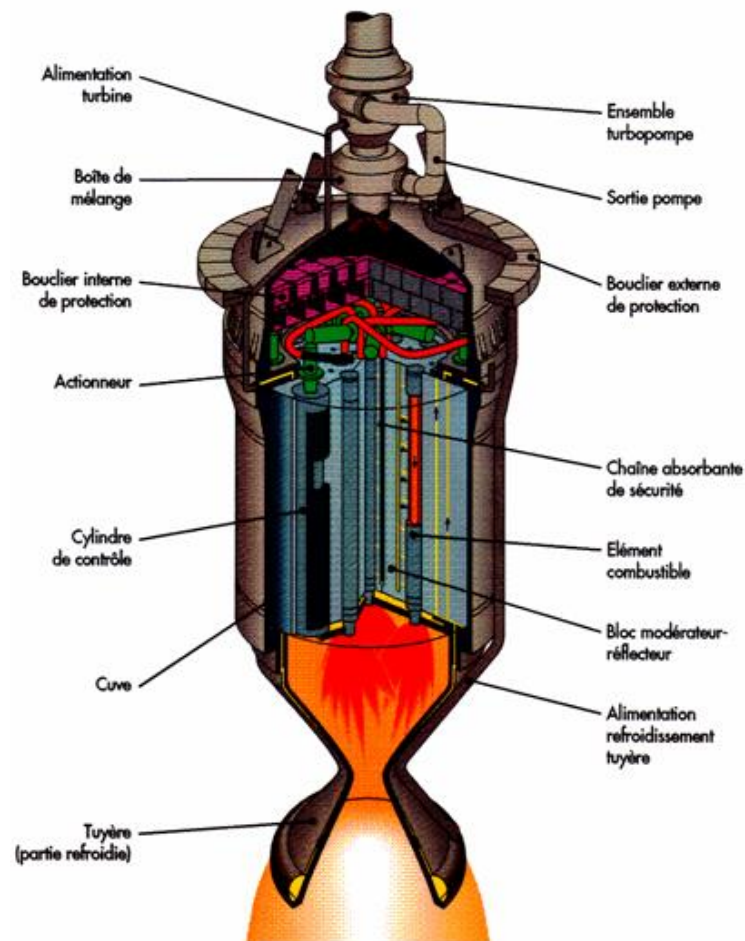


■ Puissance coeur	300 MW
■ Eléments Comb.	19
■ Diamètre Réacteur	94 cm
■ Combustible	UC ₂
■ Mod./réfl.	Be
■ Dens. Puiss.	1.5 kW/cm ³
■ T sortie cœur H	2200 K

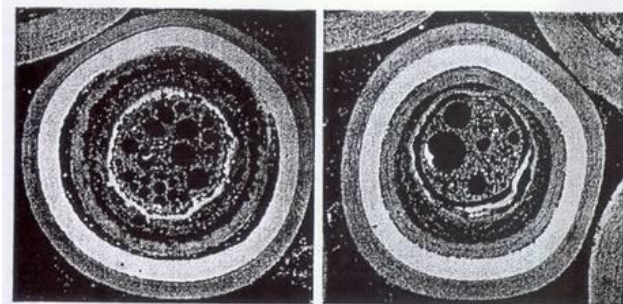
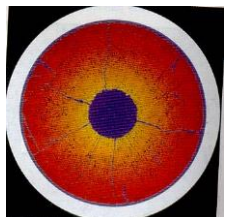
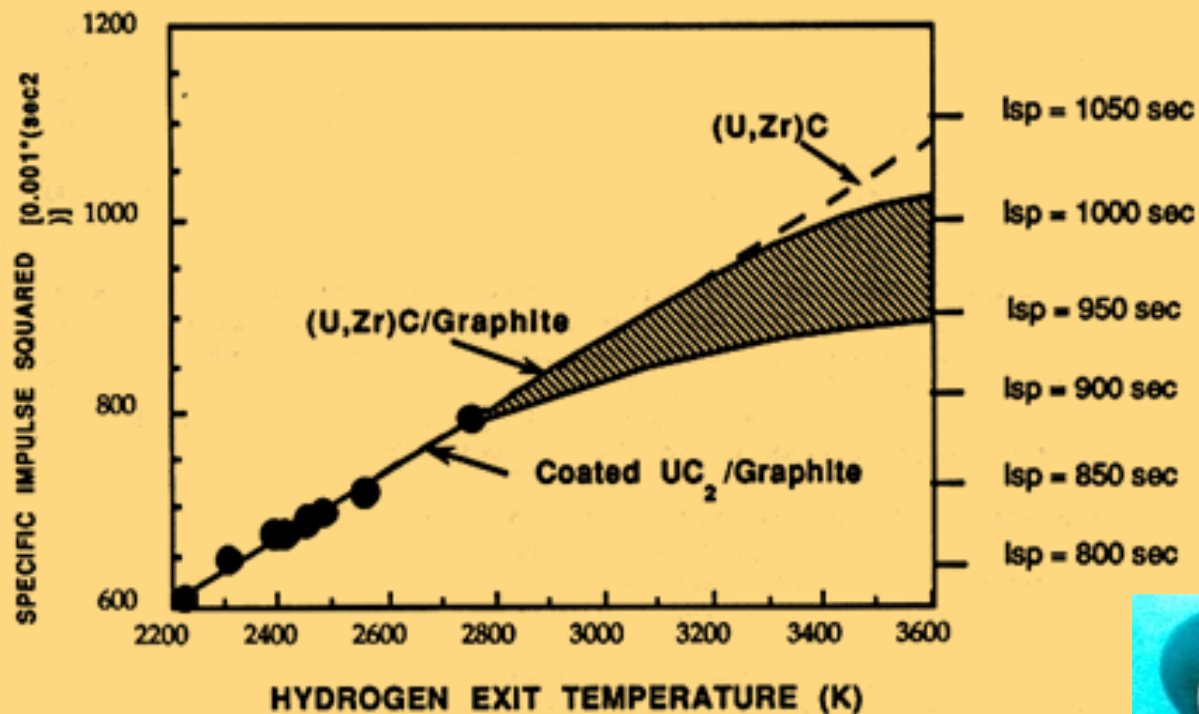
PROJET CNES-CEA 95-97

- Poussée 72 kN
- Fluide H_2
- Cycle EXPANDER
- Pression Chambre 4.3 MPa
- Température Chambre 2200 K
- Puissance Turbopompe 1.95 MW
- Impulsion Spéc. (theo.) 859 s
- ISP moyenne 786 s
- Masse Totale 1900 kg
- Hauteur 3.85 m

MAPS Moteur Atomique de Propulsion Spatiale



LE COMBUSTIBLE ET LES MATÉRIAUX : LES VRAIS DEFIS



EXPÉRIENCES PASSÉES

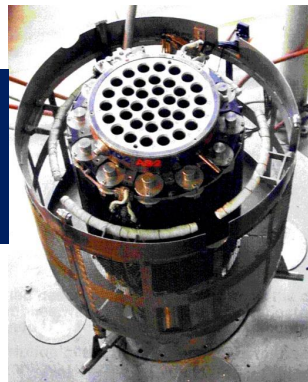
L'URSS de 1967 à 88

① Générateurs électriques

➤ 33 satellites stratégiques avec **réacteurs nucléaires**

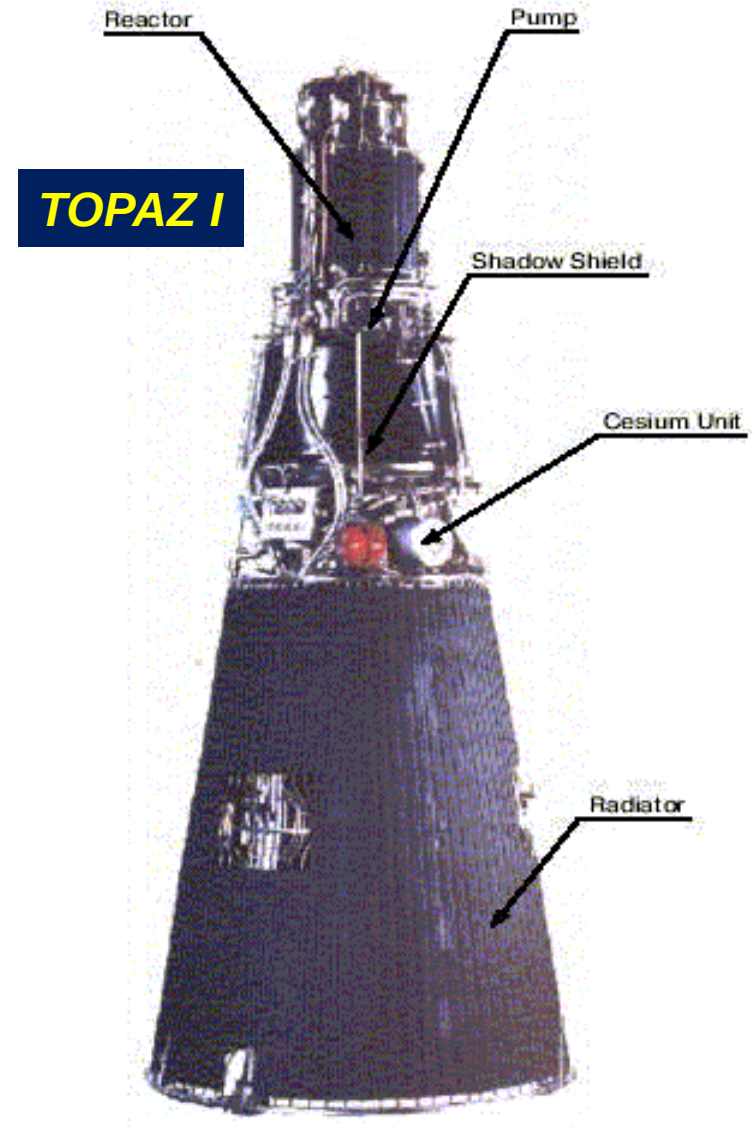
- RORSAT (U/Be/NaK et conversion thermoionique ex-core)
- 2 TOPAZ-I Komos 1818 et 1867 en 1987

**Expérience
Narcisse au
Kourchatov**

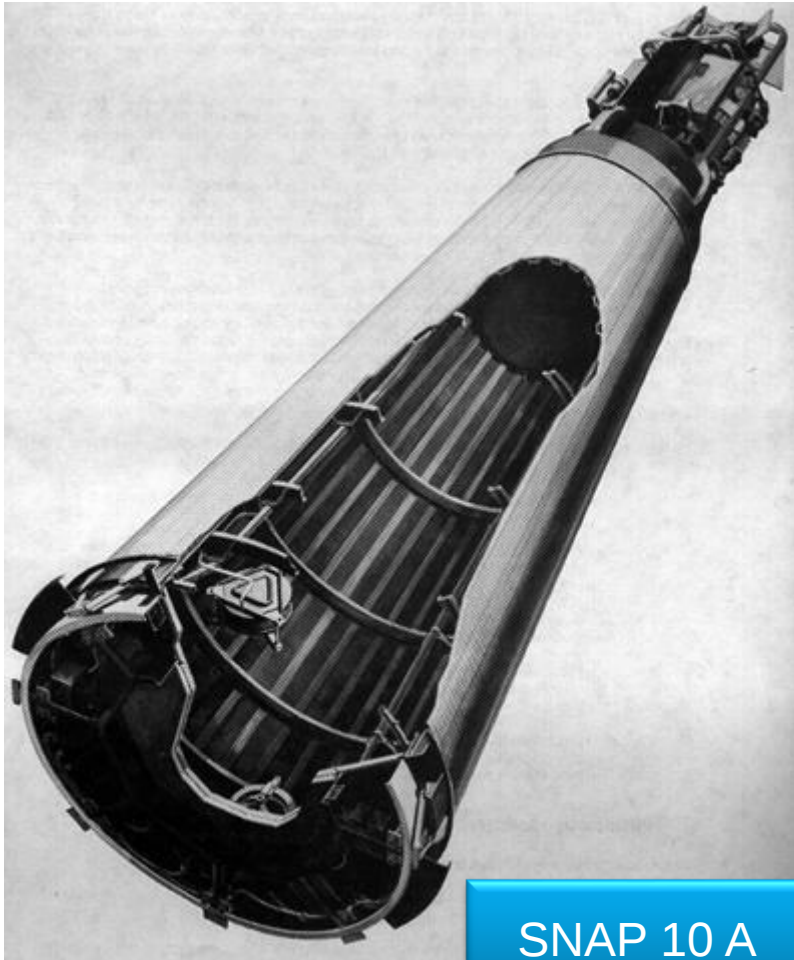


② Propulsion thermique

- R&D combustible
- Test d'éléments combustibles



LE NUCLEAIRE SPATIAL AUX USA



SNAP 10 A

Les USA (NASA,
DOD/DOE,
industriels)

① Générateurs électriques

➤ *Plus de 25 missions
depuis 1961*

> 35 générateurs radio-
isotopiques (RTG)

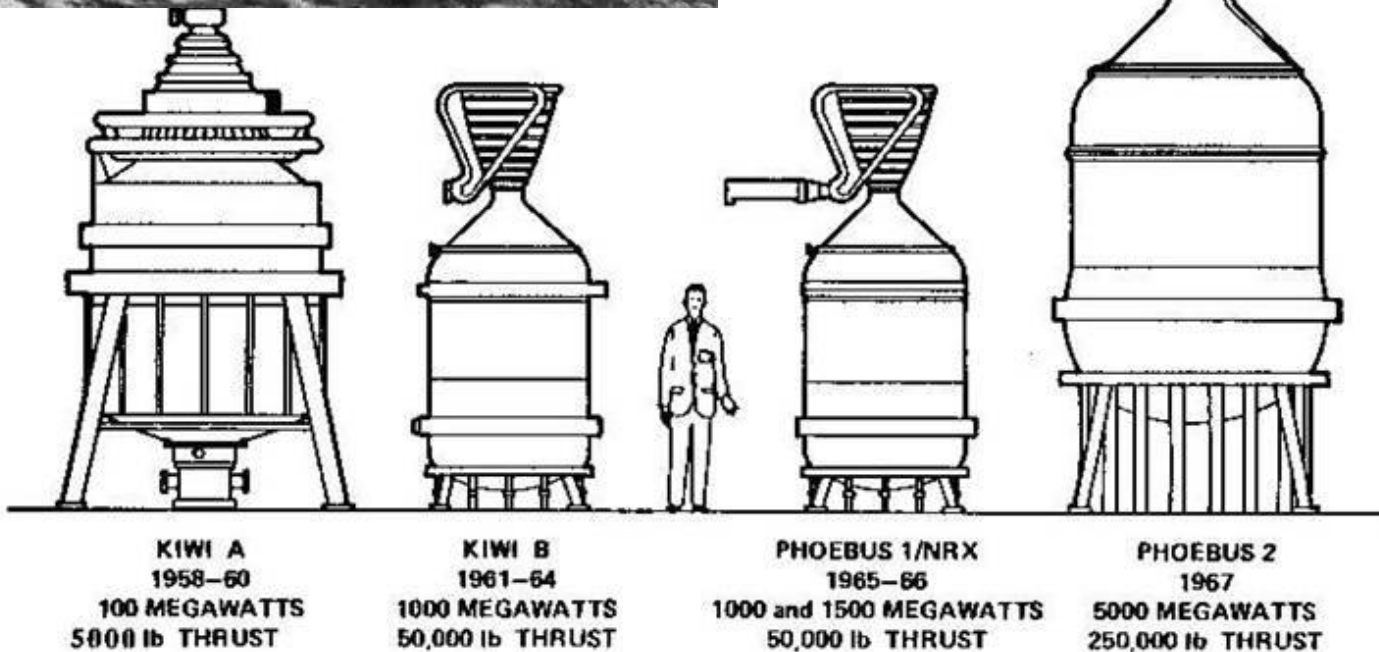
1 réacteur nucléaire a
volé, le Snap-10A

THE NERVA NTP PROGRAM

- ② Propulsion nucléothermique : Programme ROVER, NERVA
➤ 20 réacteurs testés au sol de 1960 à 1971



NERVA (60-71)

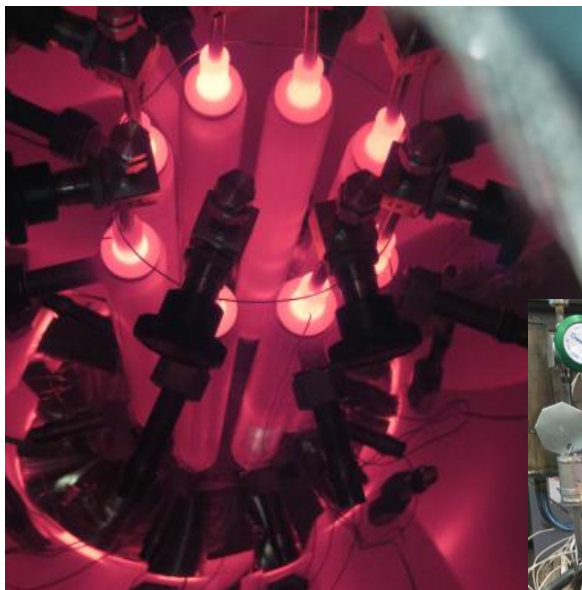


THE NERVA TESTS (60-71)

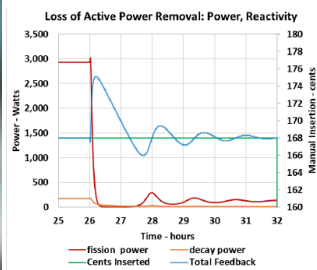


LE PROGRAMME Kilopower (2012 – 2018) !!

- 2012 : Démonstration de **faisabilité en actif** (U à 93 %)
 - **24 watts**, caloduc en eau, conversion stirling
- 2015-2018 : Projet Kilopower (**U à 93 %**)
 - **4 kWe**, caloduc en Na, conversion stirling



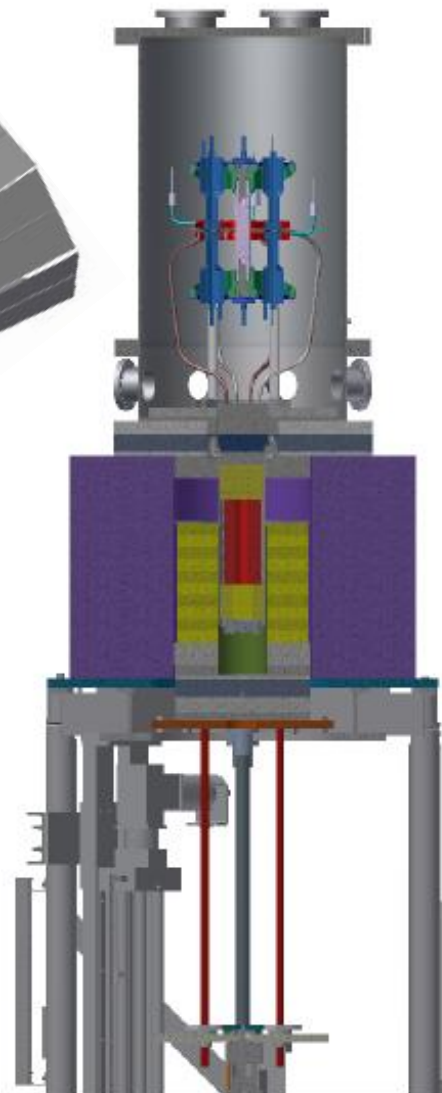
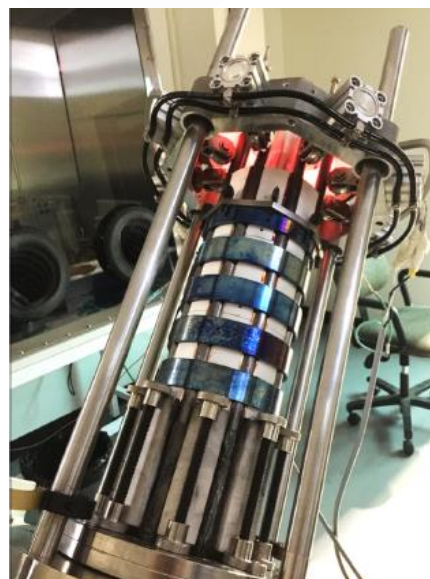
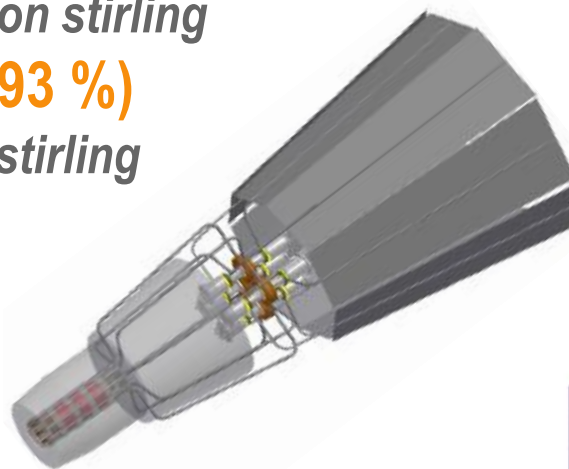
Tests caloduc Na



Echangeur
pour le stirling



Test en U non enrichi
(chauffage électrique)

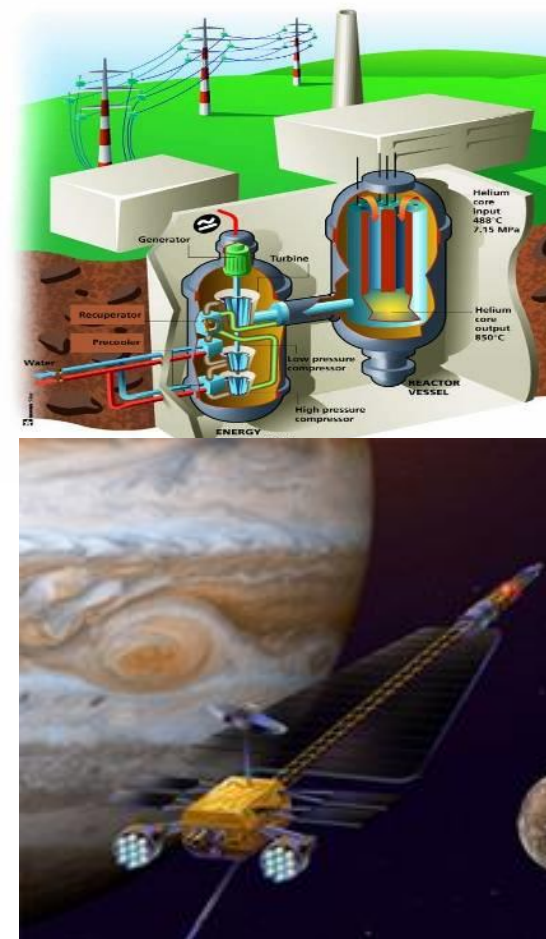


Pour les acteurs du nucléaires, les applications nucléaires spatiales c'est :

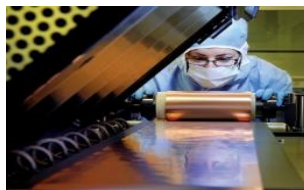
- Des **technologies** pouvant être considérées comme **précurseurs** des futurs systèmes terrestres avec un fort potentiel d'innovations
- De fortes synergies avec la **IV^{ème} génération** +
 - *Matériaux, combustibles, technologies caloporteurs, outils de simulation ...*

Pour les acteurs de la conquête spatiale

■ ... ?



Merci pour
votre attention



FROM RESEARCH TO INDUSTRY



French Alternative Energies and Atomic Energy Commission

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Centre de Saclay | 91191 Gif-sur-Yvette Cedex
T. +33 (0)1 69 08 64 92 | F. +33 (0)1 69 08 66 42

Etablissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775 685 019

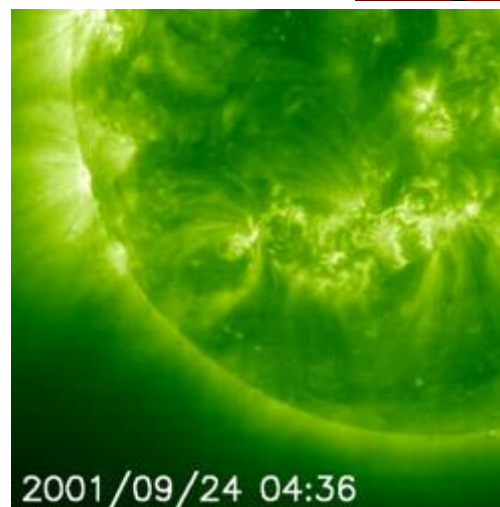
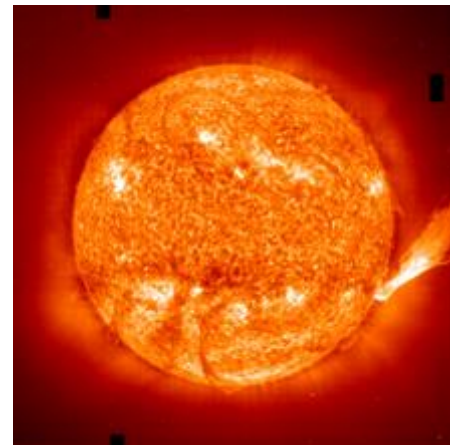
Direction de l'énergie nucléaire
Direction déléguée aux Activités
Nucléaires de Saclay
Département de Modélisation des
Systèmes et Structures

L'espace est un milieu hostile
Sans précautions particulières

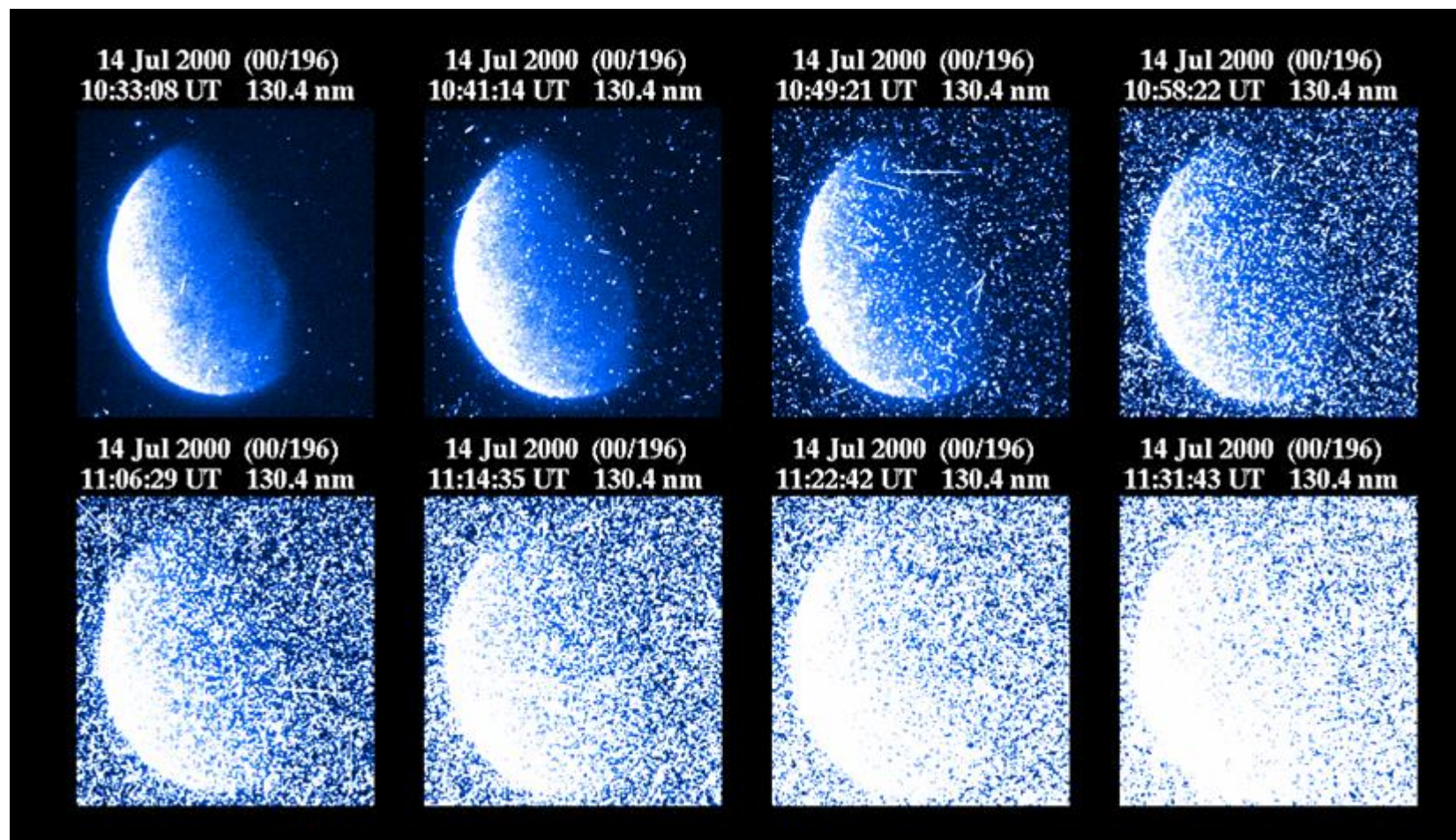
- ❑ *risques sur les êtres vivants*
- ❑ *risques sur les matériels embarqués*

– Ceinture de Van Allen,
Rayonnement Cosmique,
Particules Solaires

- p^+ (keV- 500 MeV),
- e^- (eV ~10 MeV),
- ions et ions lourds (→ 300 MeV/nuclei)

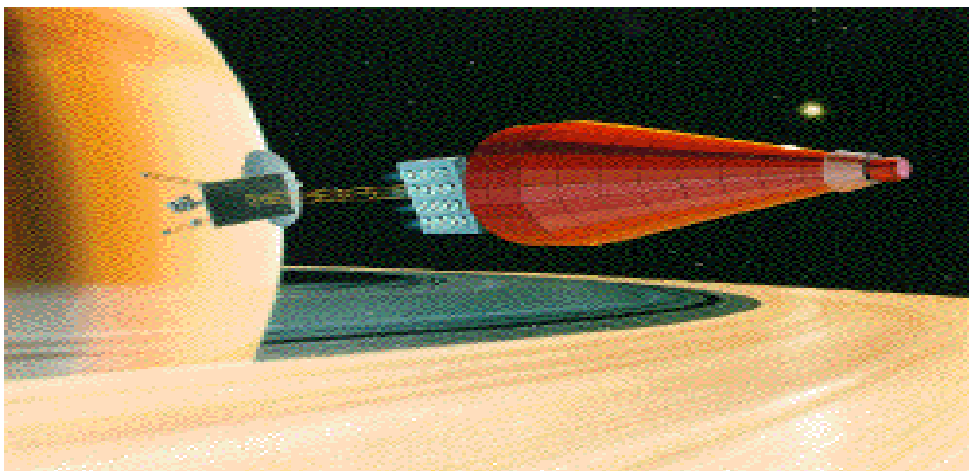


EX. D'ERUPTION SOLAIRE



L'irradiation supplémentaire induite par un **réacteur nucléaire** peut être réduite à une très faible contribution

- Bouclier de protection
- Éloignement



LA REGLEMENTATION

- Peu de recommandation de sûreté sur l'utilisation d'un **réacteur nucléaire** dans l'espace
- Des **objectifs de sûreté** auto-imposées par les pays concepteurs
 - combustible uranium
 - réacteur vierge de produits radioactifs au lancement (cœur neuf)
 - fonctionnement possible uniquement à partir d'une orbite de sécurité
 - relâchement minimum de PF en fonctionnement (principe ALARA)
 - cœur sous-critique en cas de retombée
 - ...

- Un certaine *culture de la sûreté nucléaire dans l'espace* se détache de l'expérience des projets et programmes passés
- Groupe de travail AIEA et ONU : début 2006

COMPARAISON REACTEUR/RTG

- Avantage du réacteur sur **l'inventaire radioactif** initial
- Le risque de **criticité** en cas de retombée doit être maîtrisé

Mission avec <u>RTG</u> (Cassini)	Mission avec <u>Réacteur</u>	Ex. d'accident avec RTG SNAP 9A	Ex. d'accident réacteur COSMOS 954	Tchernobyl
~ 500 kCi	<i>a few Ci</i>	17 kCi	85 kCi (potentiel) 50 Ci (récupéré)	> 30 MCi