

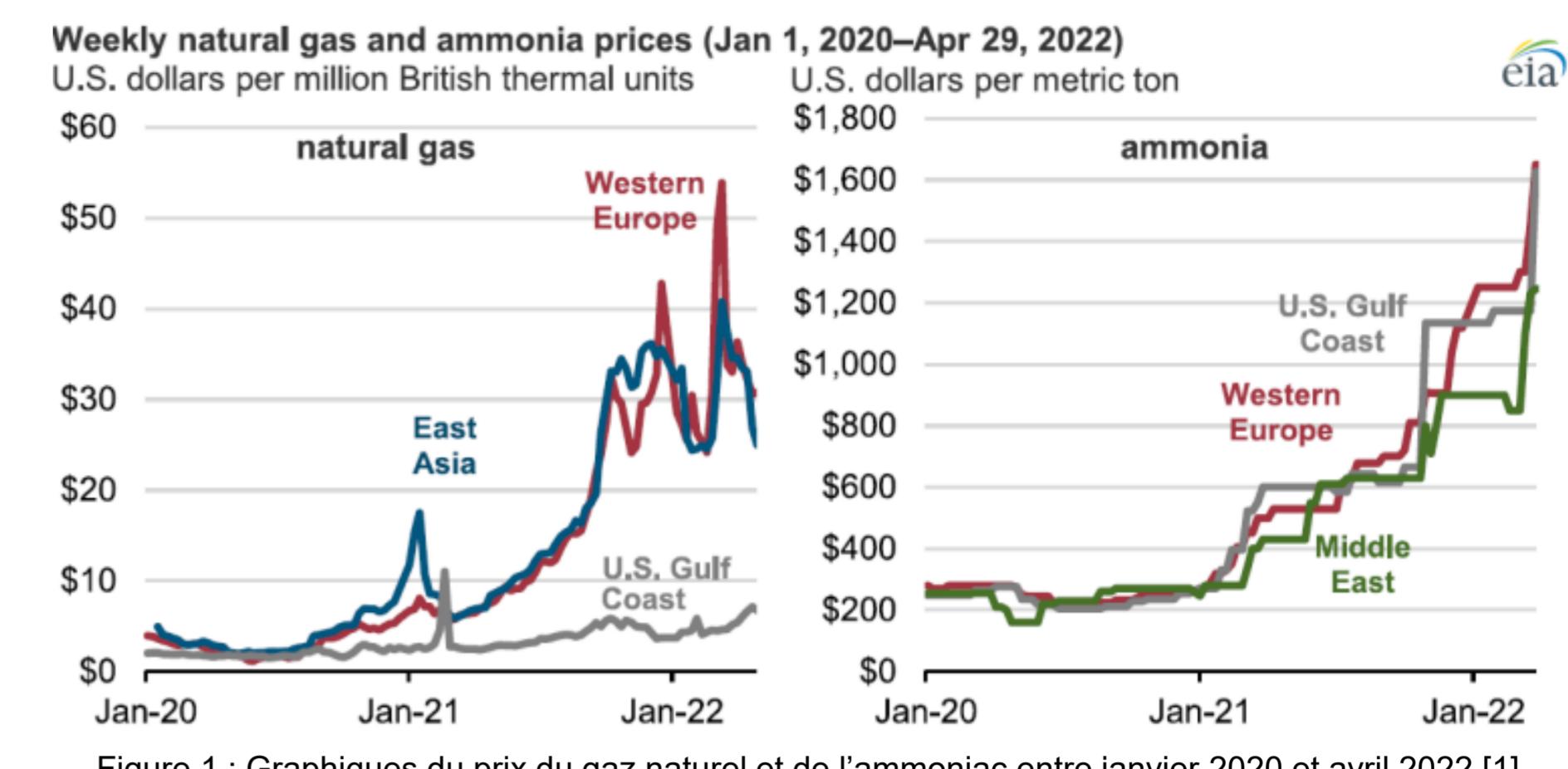
pour la souveraineté alimentaire

BERTHOD Lubin

Master 1 – Risques Environnementaux et Sûreté Nucléaire

## Introduction

L'ammoniac, est une molécule essentielle pour l'agriculture mondiale puisqu'il est l'ingrédient principal des engrais azotés. Le procédé de production de l'ammoniac est très demandant en ressource et émet beaucoup de CO<sub>2</sub>. Tout d'abord la production d'hydrogène. A l'heure actuelle la quasi-totalité de l'hydrogène est produit à partir d'hydrocarbures, (gaz ; charbon ; pétrole). La production mondiale d'engrais azotés est fortement corrélée au prix du gaz naturel. Lors du choc énergétique lié à l'invasion de l'Ukraine en 2022, le gaz représentait jusqu'à 90 % des coûts variables de production de certains engrais en Europe [1], entraînant une crise d'approvisionnement et une volatilité des prix de l'ammoniac. L'intégration de petites centrales modulaires nucléaires (SMR) avec des électrolyseurs haute-température (HTSE) et le procédé Haber-Bosch permettrait de produire de l'ammoniac faiblement carboné, d'améliorer la sécurité d'approvisionnement et de diminuer la vulnérabilité aux fluctuations du marché du gaz. Pour le moment seule l'entreprise Nuscale propose de mettre en œuvre les deux procédés par un SMR [2].



## I - Comment sont produits l'hydrogène et l'ammoniac actuellement

### Hydrogène

- 95 % de l'hydrogène mondial provient d'hydrocarbures : gaz naturel, charbon et pétrole.
- La technologie dominante est le vaporeformage du méthane (SMR) :
  - réaction  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}/\text{CO}_2$
  - procédé très énergivore et fortement émetteur ( $\approx 9\text{--}12 \text{ kg CO}_2/\text{kg H}_2$ ).
- La gazéification du charbon (utilisée en Chine) est encore plus carbonée ( $\approx 19 \text{ kg CO}_2/\text{kg H}_2$ ). [1]
- La production d'H<sub>2</sub> représente environ 2% des émissions globales de CO<sub>2</sub>.
- Cette dépendance aux hydrocarbures rend l'industrie de l'ammoniac vulnérable au prix du gaz.

### Ammoniac

- Réaction :  $\text{N}_2 + 3 \text{ H}_2 \rightarrow 2 \text{ NH}_3$ .
- Fonctionne à 400–500 °C et 150–250 bars avec un catalyseur en fer.
- Le mélange NH<sub>3</sub> est liquéfié, les gaz non réagis sont recyclés en boucle.
- Le procédé est très énergivore : 25–35 GJ/t NH<sub>3</sub>, dont >80 % proviennent de la production d'H<sub>2</sub>. [1]

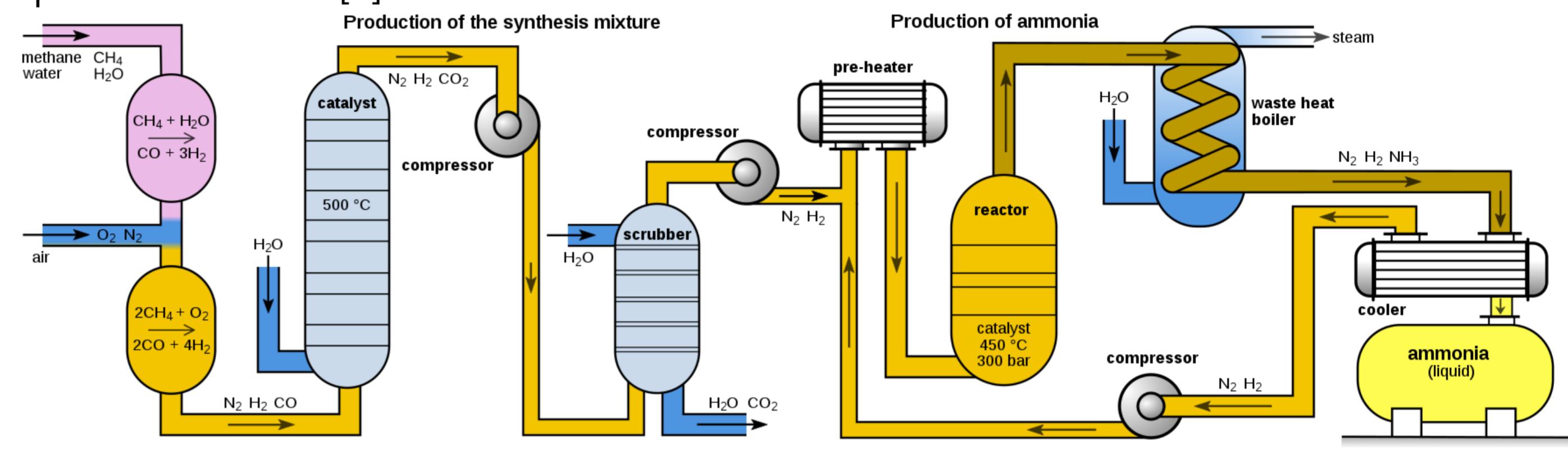


Figure 2 : Schéma de production de l'hydrogène et de l'ammoniac [4]

## II – L'électrolyse HTSE

L'HTSE (High-Temperature Steam Electrolysis) utilise la vapeur d'eau et un électrolyseur à oxyde solide (SOEC) fonctionnant à 700–850 °C. Ici la chaleur produite par un SMR peut permettre d'alimenter le processus en chaleur en plus de l'électricité nécessaire.

D'après Nuscale un seul module de 77 MWe pourrait produire jusqu'à 50t d'hydrogène par jour.

La rentabilité du processus est 30% supérieure à l'électrolyse basse température. [2]

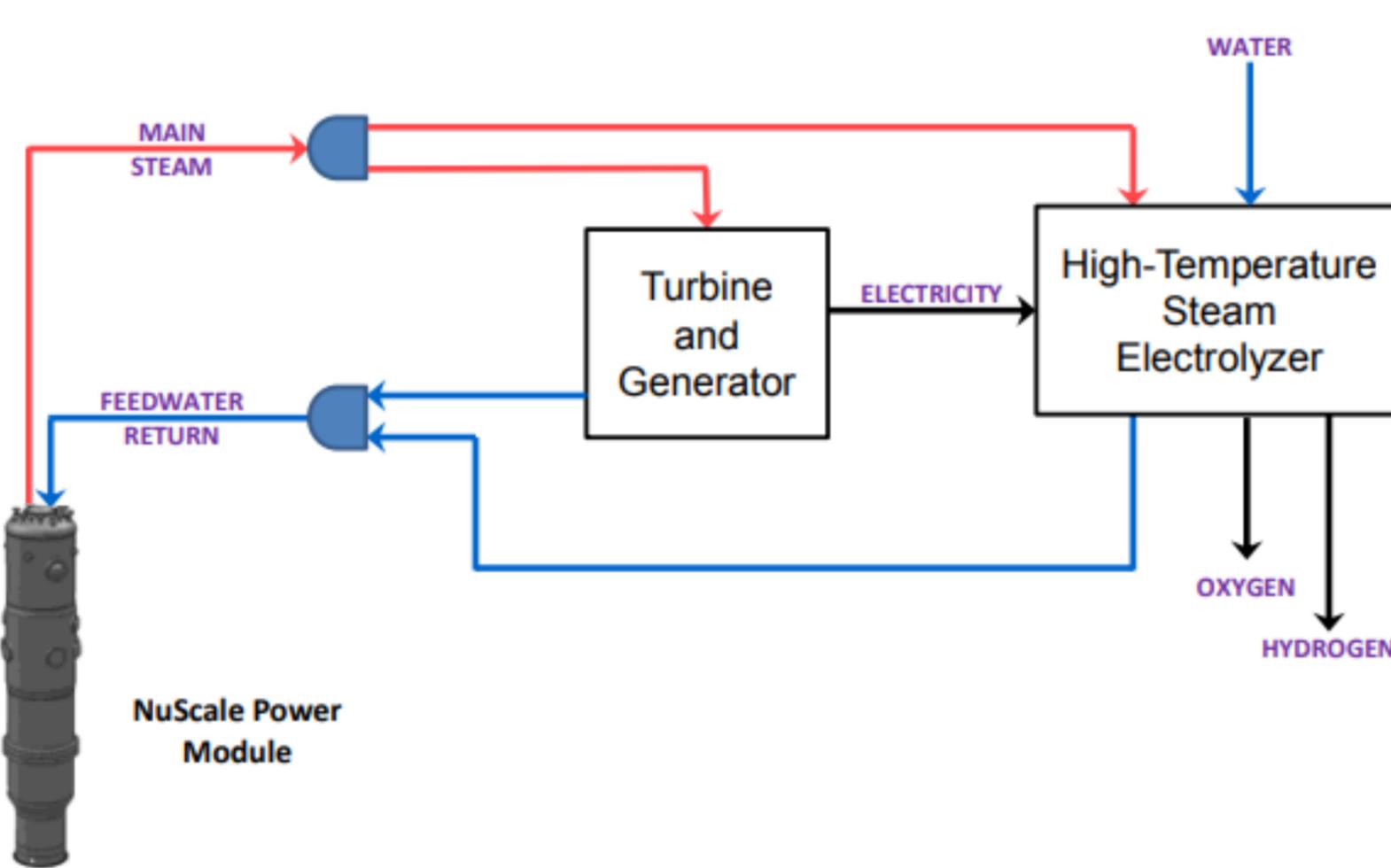


Figure 3 : Schéma de production de l'hydrogène avec technique HTSE [2]

## III – Procédé Haber-Bosch alimenté par SMR

Une SMR peut fournir à la fois :

- Une électricité stable pour les compresseurs et auxiliaires Haber-Bosch
- De la chaleur et de la vapeur utiles pour l'optimisation thermique du procédé
- De l'hydrogène continu via l'HTSE.

L'intégration est synergique : la vapeur du SMR n'est pas seulement utilisée pour l'électrolyse, elle participe au préchauffage des réactifs nécessaires à la synthèse. De plus, la production locale d'électricité élimine les pertes en ligne, rendant le bilan énergétique global du système SMR-HTSE-HB supérieur aux installations séparées. [2]

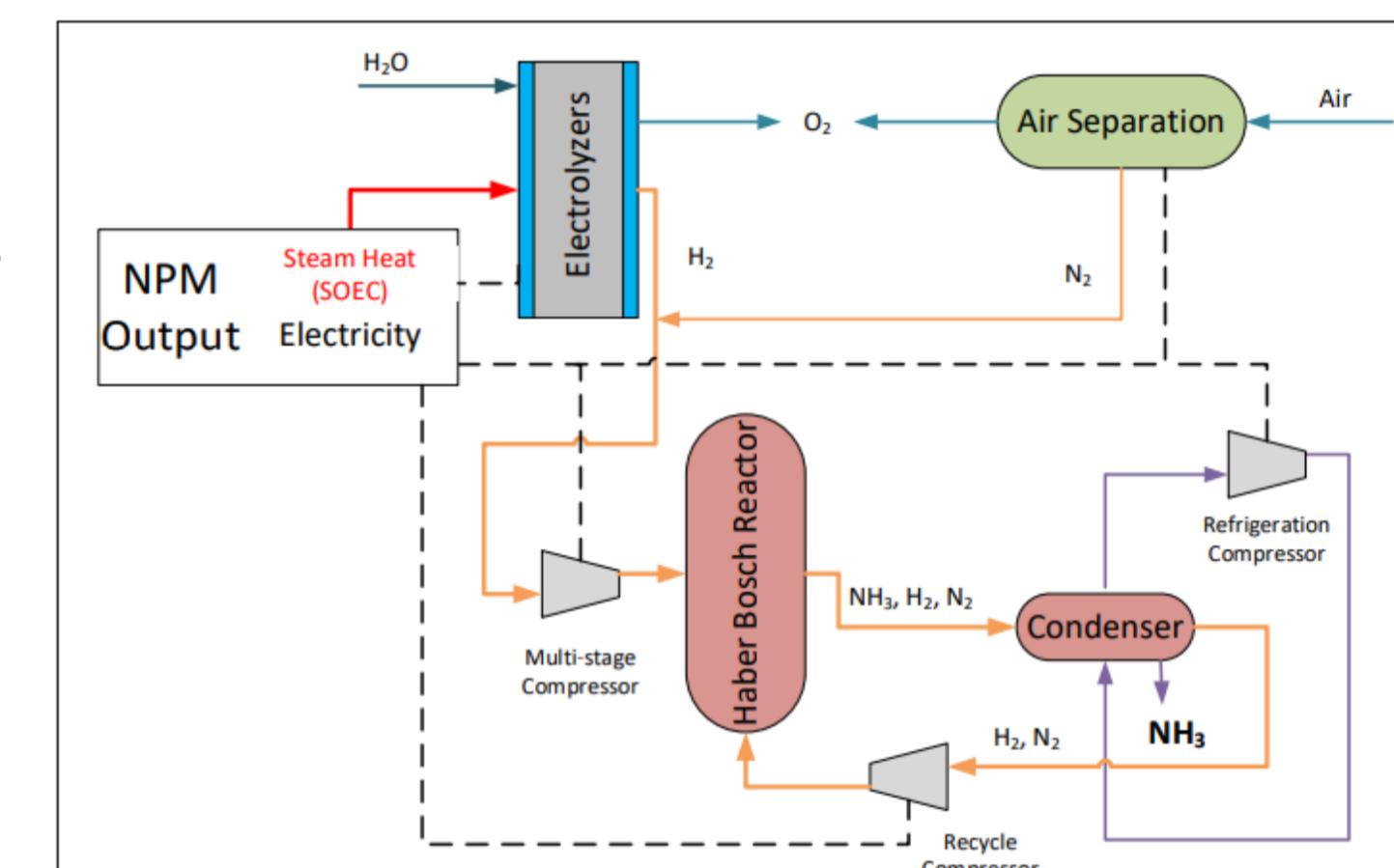


Figure 4 : Schéma de la chaîne de l'ammoniac avec hydrolyse [2]

## IV – Rendement et sûreté

L'intégration d'un Small Modular Reactor (SMR) dans la filière ammoniac repose sur la valorisation simultanée de l'électricité, de la chaleur et de la vapeur produites par le réacteur. Ce couplage permet d'alimenter efficacement l'électrolyse haute température (HTSE) ainsi que la synthèse Haber-Bosch.

- **Efficacité supérieure** : Ce couplage thermique permet une efficacité **30 % supérieure** à l'électrolyse basse température classique.
- **Gain thermodynamique (HTSE)** : L'électrolyse de la vapeur d'eau (700–850°C) demande moins d'énergie électrique que l'électrolyse de l'eau liquide (PEM/Alcaline). La chaleur du SMR remplace une partie de l'électricité nécessaire.
- **Capacité de production** : Un seul module NuScale de 77 MWe permettrait de produire environ **50 tonnes d'hydrogène par jour**, assurant une alimentation massive pour la synthèse d'ammoniac. [2]

L'ammoniac étant un composant explosif et inflammable dans certaines conditions les deux procédés doivent être isolés. L'un de l'autre pour éviter tout risque d'accident chimique qui pourrait devenir un accident nucléaire en cas de réaction en cascade.

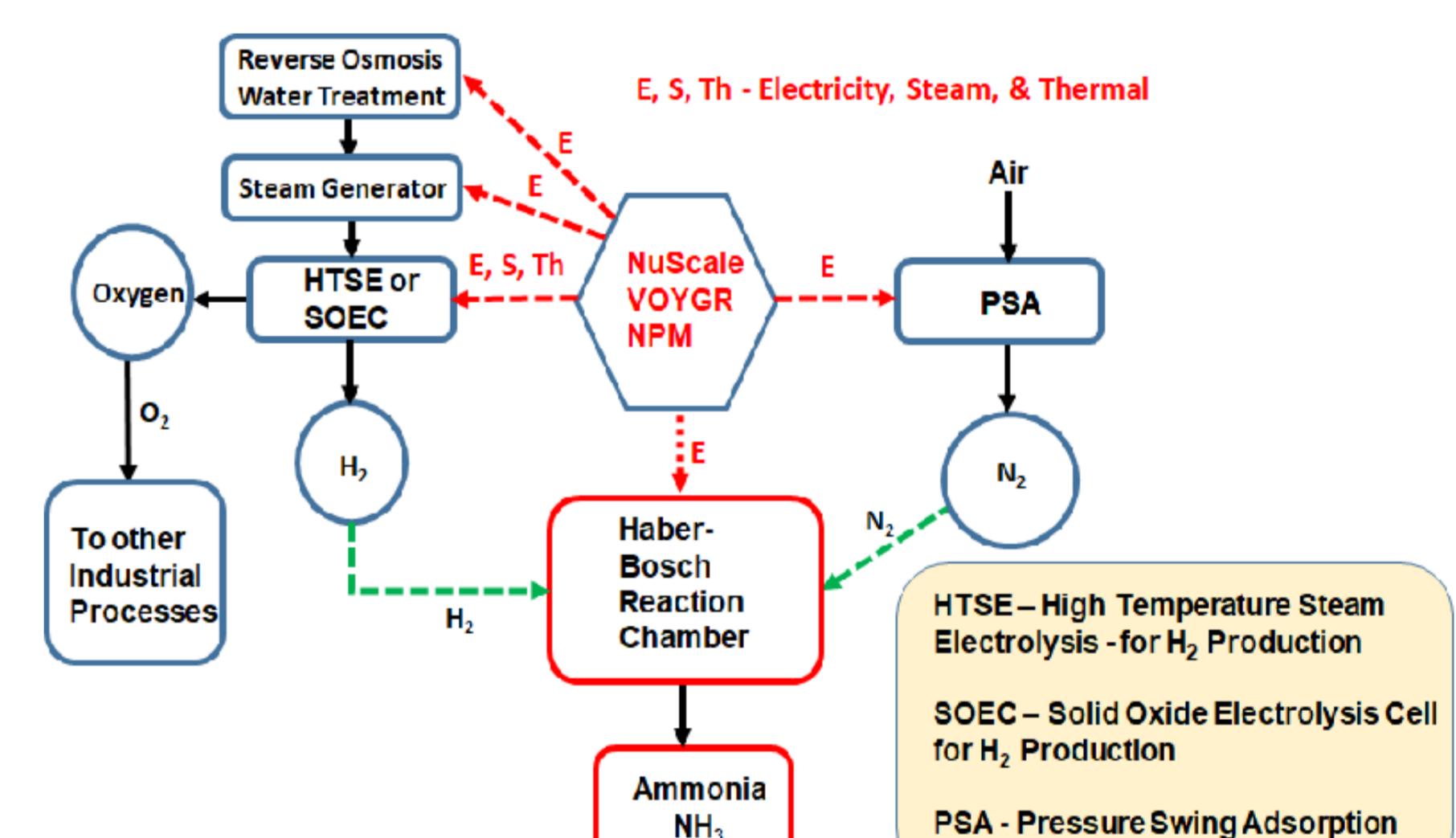


Figure 5 : Schéma de la chaîne de l'ammoniac avec intégration d'un SMR Nuscale [5]

## Conclusion

La production d'ammoniac repose aujourd'hui majoritairement sur le gaz naturel, ce qui expose l'industrie des engrais à de fortes contraintes économiques et environnementales.

Le couplage d'un Small Modular Reactor (SMR) avec une électrolyse haute température (HTSE) et le procédé Haber-Bosch constitue une alternative crédible pour produire un ammoniac bas-carbone, tout en améliorant le rendement énergétique global.

Grâce à une fourniture continue d'électricité, de chaleur et de vapeur, les SMR permettent une production stable et industrialisable d'hydrogène. Cette approche renforce la sécurité d'approvisionnement, limite les émissions de CO<sub>2</sub> et ouvre la voie à une filière européenne d'engrais décarbonée, compatible avec les exigences de sûreté nucléaire.

## Bibliographie

- [1] Idaho National Laboratory (2010). *Nuclear-Integrated Ammonia Production Analysis (TEV-666)*. Idaho National Laboratory, Technical Evaluation Report.
- [2] NuScale Power (2025). *NuScale Small Modular Reactor Integration for Hydrogen and Ammonia Production*. Office of Technology, NuScale Power, Corvallis, OR.
- [3] INL Digital Library (n.d.). *HTSE / Hydrogen production studies*. Idaho National Laboratory.
- [4] Techno-Science.net (n.d.). *Procédé Haber*. Techno-Science.net.
- [5] Kozel, A., Tsang, F., Reyes, J., DePavia, L. (2023). *Utilization of NuScale VOYGR NPP Integrated Energy System (IES) for the Production of Decarbonized Ammonia*. Proceedings, AIChE Annual Meeting 2023.