



ACADÉMIE
DES SCIENCES
INSTITUT DE FRANCE

Comptes Rendus

Mécanique

Laura Matteo et Nicolas Tauveron

Générer de la vapeur pour produire de l'électricité dans les centrales nucléaires

Volume 352, Numéro spécial S1 (2024), p. 35-41

En ligne depuis le 15 novembre 2024

Numéro publié le 15 novembre 2024

Numéro spécial : Hommage à Denis Papin

Rédacteur en chef invité : Bruno Chanetz (Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA), BP80100, 91123 Palaiseau Cedex, France)

<https://doi.org/10.5802/crmeca.260>



Cet article est publié sous la licence

CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION 4.0 INTERNATIONAL.

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



*Les Comptes Rendus. Mécanique sont membres du
Centre Mersenne pour l'édition scientifique ouverte*
www.centre-mersenne.org — e-ISSN : 1873-7234



Histoire des sciences et des idées / *History of Sciences and Ideas*

Hommage à Denis Papin / *A tribute to Denis Papin*

Générer de la vapeur pour produire de l'électricité dans les centrales nucléaires

Vapor generation for electricity production purpose in nuclear facilities

Laura Matteo ^{Ⓢ,*,a} et Nicolas Tauveron ^{Ⓢ,b}

^a Département d'Études des Réacteurs, CEA, DES/IRENE/DER/SESI/LCOS, F-13108 Saint-Paul-Lez-Durance, France

^b Université Grenoble Alpes, CEA, DES/LITEN/DTCH/SSETI/LCST, F-38000 Grenoble, France

Courriel : laura.matteo@cea.fr (L. Matteo)

Résumé. L'article brosse une brève vision historique de l'utilisation de la vapeur dans les grandes installations industrielles que sont les réacteurs nucléaires. Différentes générations de réacteurs sont passées en revue, depuis les réacteurs refroidis au gaz jusqu'aux réacteurs à eau, en passant par les réacteurs à métal liquide. Des usages nouveaux ou renouvelés de la vapeur d'eau et de la vapeur de fluide organique sont également abordés (cogénération, réseau de chaleur, production d'hydrogène par électrolyse, dessalement d'eau de mer par voie thermique, système de sûreté).

Abstract. This article provides a brief historical overview of the use of steam in large-scale industrial installations such as nuclear reactors. Different generations of reactors are reviewed, from gas-cooled to water-cooled to liquid metal reactors. New or renewed uses for steam and organic fluid steam are also discussed (cogeneration, heat networks, hydrogen production by electrolysis, thermal seawater desalination, safety systems).

Mots-clés. Cycle de Rankine, Carnot, Réacteur nucléaire, Turbine, Conversion.

Keywords. Rankine cycle, Carnot, Nuclear reactor, Turbine, Conversion.

Manuscrit reçu le 27 mars 2024, révisé le 13 juin 2024, accepté le 17 juin 2024.

1. Bref historique de l'usage de la vapeur dans le cadre industriel

La première machine à vapeur naît au XVII^e siècle dans un contexte d'exploitation des mines de charbon anglaises. L'eau s'accumulait dans les points les plus bas des mines, rendant alors rapidement les gisements inexploitable. Ce contexte poussa les inventeurs de l'époque à rechercher

* Auteur correspondant

des solutions mécaniques pour l'extraction de l'eau en remplacement des actions manuelles de fait inefficaces.

L'approche de ces premiers inventeurs de machines à vapeur est principalement expérimentale. Leurs recherches donnent lieu successivement à [1, 2] :

- La machine de Papin en 1681 ;
- La pompe à feu de Savery en 1698 ;
- La machine à feu de Newcomen en 1712 ;
- La machine de Watt en 1769.

La diversification des usages industriels des machines à vapeur arrive alors, avec la distribution d'eau dans les villes qui devient envisageable en recourant à ce type de machines et représente une véritable avancée pour le confort des citoyens au quotidien à cette époque.

Par la suite c'est le premier véhicule à vapeur imaginé par Cugnot en 1771 qui voit le jour, puis le bateau à vapeur de d'Abbas en 1783 et finalement la locomotive à vapeur de Stephenson en 1814 dont on connaît le rôle primordial pour le transport de personnes et de marchandises au XIX^e siècle.

C'est dans un deuxième temps en 1824 qu'intervient Sadi Carnot, jeune français et ancien élève de l'École polytechnique âgé alors de 28 ans, qui pose les fondements théoriques de la thermodynamique (même si le mot ne fut introduit que plus tard par Lord Kelvin en 1849) parmi lesquels : la nécessité d'une théorie générale, le rapport entre chaleur et travail, l'indépendance du fluide de travail, le rôle de la source froide et le fameux cycle qui allait porter son nom. Son précieux écrit *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* est considéré comme une référence scientifique majeure [3]. Le rendement de Carnot, dont l'expression très simple met en jeu uniquement les températures froide et chaude impliquant un cycle thermodynamique, permet toujours dans les études actuelles de connaître rapidement la valeur maximale théorique du rendement d'un cycle donné :

$$\eta_c = 1 - T_f / T_c.$$

Avec, dans cette formule, η_c le rendement de Carnot, T_f la température de la source froide et T_c celle de la source chaude.

Carnot est suivi plus tard par Clapeyron en 1834 qui travaille sur le changement de phase, Joule en 1847 qui énonce le premier principe de la thermodynamique, Thomson en 1845–1850 et Clausius en 1850 qui achèvent de construire les lois de la thermodynamique telles que nous les connaissons aujourd'hui.

C'est l'inventeur Parsons qui permet à la turbine à vapeur « moderne » de voir le jour en 1884. Il est possible de remonter jusqu'au 1^{er} siècle en trouvant des prototypes cousins de la turbine vapeur telle que nous la connaissons, parfois rudimentaires mais basés sur le même principe de conversion de pression du fluide en énergie mécanique de rotation d'un arbre solide. L'ancêtre le plus lointain datant du I^{er} siècle est l'éolipyle inventé par le mathématicien Héron d'Alexandrie [1].

Depuis lors, un enjeu important consiste à optimiser la géométrie de la turbine vapeur en vue d'en améliorer le rendement de conversion. Cela a pu se faire via des essais expérimentaux mais aussi en profitant aujourd'hui de moyens informatiques conséquents et d'outils de simulation monodimensionnels & tridimensionnels performants, permettant d'affiner toujours plus le dessin des aubes et de la machine complète.

2. La turbine vapeur et le cycle de Rankine

L'usage de la turbine vapeur permettant la conversion d'une différence de pression en une énergie mécanique de rotation se fait au sein d'un cycle thermodynamique dit « de Rankine »,

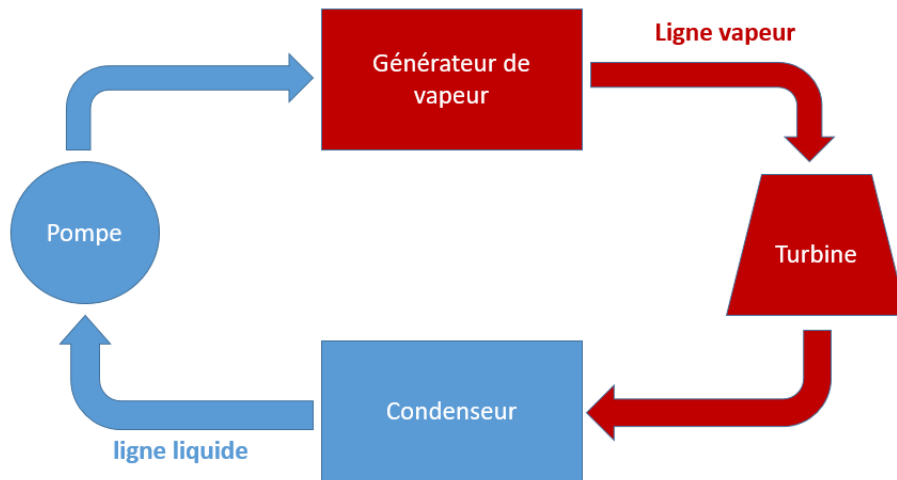


FIGURE 1. Cycle de Rankine élémentaire.

du nom de son inventeur. Il s'agit d'un cycle à changement de phase où une source de chaleur transfère son énergie à de l'eau initialement liquide, qui sous ce flux de chaleur va venir se vaporiser et continuer à évoluer dans le cycle sous forme gazeuse. Un schéma de principe d'un cycle thermodynamique de Rankine élémentaire est donné en figure 1, lequel met en avant les principaux composants élémentaires d'un tel système de conversion :

- **La source chaude**, constituée du générateur de vapeur (échangeur de chaleur fournissant une certaine quantité de chaleur à l'eau et donnant lieu à sa vaporisation) ;
- **La machine de conversion permettant de récupérer un travail**, constituée de la turbine vapeur (conversion d'une différence de pression en une énergie mécanique de rotation) ;
- **La source froide** constituée du condenseur (échangeur de chaleur permettant de prélever une certaine quantité de chaleur à l'eau sous phase gazeuse et donnant lieu à sa condensation) ;
- **La machine de conversion fournissant un travail**, constituée de la pompe (conversion d'une énergie mécanique de rotation en différence de pression).

Les cycles de Rankine étant des cycles thermodynamiques à changement de phase, ils permettent d'assurer la fourniture de travail via le pompage en phase liquide, ce qui est peu coûteux en énergie en comparaison de la compression en phase gazeuse qui existe dans les cycles thermodynamiques à gaz (sans changement d'état liquide-vapeur) de type Brayton par exemple. D'un point de vue pratique, les pompes des cycles de Rankine peuvent être alimentées électriquement sans contrainte de positionnement et sans se soucier du rendement de conversion du moteur électrique (généralement très élevé), alors que les compresseurs des cycles Brayton à gaz sont souvent connectés mécaniquement à l'arbre de la turbine dans un souci d'économie d'énergie et de faisabilité technologique.

3. Usage de la vapeur d'eau dans l'industrie nucléaire

Plusieurs technologies de réacteurs nucléaires existent dans le monde et ont pu coexister en France, mais la plus commune reste celle des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP). Initialement

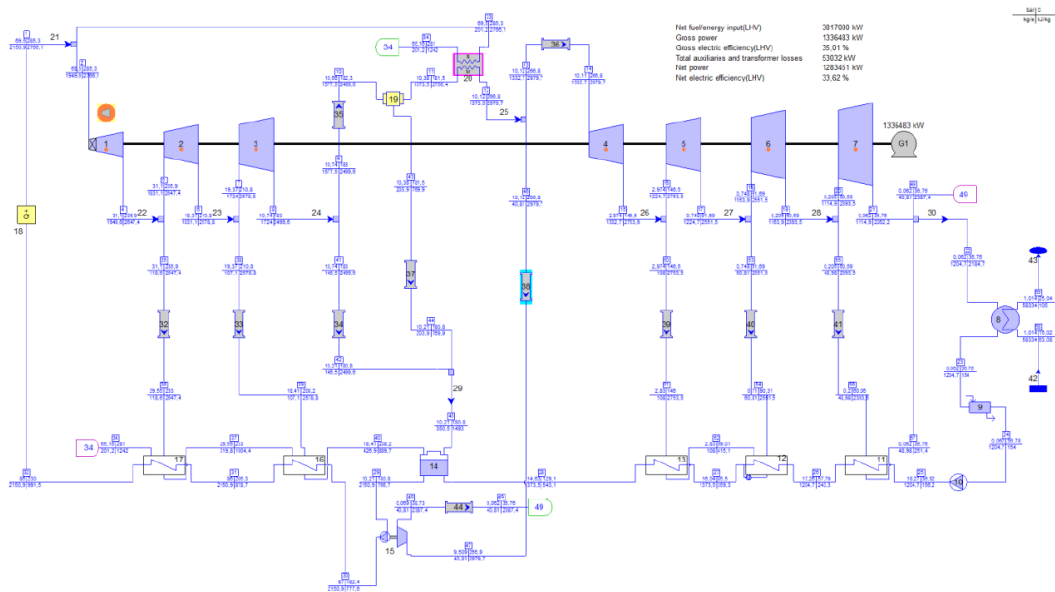


FIGURE 2. Modèle THERMOFLEX d'un REP 1300 MWe [4].

sous licence américaine, cette technologie a été adaptée par la suite en France. Elle a également été portée par le développement de la propulsion navale militaire.

Ces réacteurs sont composés de deux circuits principaux dans lesquels circule de l'eau. Au sein du circuit primaire, l'eau est mise sous pression (155 bars) de sorte à rester sous sa phase liquide même à 320 °C. Elle est pompée afin d'assurer la circulation forcée du fluide (par opposition à la circulation naturelle qui existe sous conditions de géométrie, de gravité et d'écart de température entre deux points). La circulation forcée permet une bonne extraction de la chaleur au niveau du cœur nucléaire, ainsi que son transport jusqu'au générateur de vapeur. Ce dernier constitue la source froide du point de vue du circuit primaire, mais la source chaude du point de vue du circuit secondaire qui est tout simplement le cycle de Rankine servant à la conversion thermique-mécanique puis électrique.

Bien que le principe de fonctionnement soit le même et que les composants stratégiques soient toujours présents, un cycle de Rankine industriel s'éloigne assez fortement d'un cycle de Rankine élémentaire de par sa complexité architecturale. Une illustration de modélisation [4] d'un cycle de Rankine de REP à l'aide du logiciel Thermoflex est proposée en figure 2, laquelle permet de fournir une estimation précise du rendement (autour de 34 %) et d'appréhender le degré de complexité du système. En effet, la recherche d'optimisation du rendement a conduit les ingénieurs à créer des chemins secondaires pour le fluide dit « soutirages » en plus du circuit principal, ainsi que des échangeurs de chaleur permettant de préchauffer ou de surchauffer le fluide dans certaines zones. L'énergie n'est pas prise ailleurs que dans le cycle de Rankine lui-même, mais elle est distribuée aux endroits qui permettent de maximiser l'efficacité du cycle. Il faut également mentionner qu'une fraction de la vapeur est aussi utilisée pour directement entraîner une turbopompe dans le circuit secondaire (visible en bas de la figure 2).

Pour expliquer l'utilisation de la vapeur dans le cadre de l'énergie nucléaire, nous allons toutefois nous ramener à une architecture simplifiée du cycle de Rankine servant à la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique (figure 1), puis électrique via la connexion de la turbine à un alternateur.

La régulation de la puissance fournie par le réacteur peut se faire via la variation de l'admission de vapeur à la turbine. Ceci est très utile pour l'exploitant qui peut utiliser une partie de son parc de réacteurs nucléaires en mode « réseau prioritaire » ce qui permet de faire varier la production en fonction de la demande et de la fourniture d'électricité par les autres systèmes énergétiques (intermittents notamment).

D'autres technologies de réacteurs nucléaires font usage de la vapeur d'eau pour la conversion d'énergie. Les réacteurs dits « bouillants » sont des réacteurs à eau à cycle direct, c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'échangeur de type générateur de vapeur permettant de transférer l'énergie à un second circuit et isolant ainsi le cœur nucléaire et l'eau du circuit primaire. Au lieu de se faire au circuit secondaire, le changement de phase est opéré dès la sortie du cœur nucléaire, point chaud du réacteur. La vapeur chemine ainsi directement vers les turbines pour la transformation en énergie mécanique.

Les Réacteurs à Neutrons Rapides refroidis au sodium métallique liquide (RNRNa) disposent eux de trois circuits distincts. Un circuit primaire en fluide sodium où se trouve le cœur, un secondaire toujours en sodium qui sert à transporter l'énergie vers un dernier circuit en eau (le cycle de Rankine servant à la conversion d'énergie). L'ajout d'un circuit intermédiaire a un rôle vis-à-vis de la sûreté car il permet d'éloigner toute éventuelle réaction chimique sodium-eau du cœur du réacteur. Le troisième circuit est très semblable au cycle de Rankine des REP décrit plus haut. Des réacteurs de ce type ont existé en France (Rapsodie, Phénix, Superphénix) mais ne sont plus en exploitation aujourd'hui. De par la haute température disponible du côté de la source chaude (environ 550 °C en sortie du cœur nucléaire), le rendement global d'un RNRNa est supérieur à celui d'un REP de quelques pourcents (le rendement est supérieur à 40 % [5]). La température de la source froide (fleuve, air ambiant) étant la même quelle que soit la technologie de réacteur installée dans la centrale nucléaire, nous pouvons aisément nous attendre à cette amélioration du rendement grâce à l'expression du rendement de Carnot!

Il faut également rappeler que les réacteurs nucléaires dits de première génération (la filière « uranium Naturel Graphite Gaz ») utilisaient un circuit primaire dont le caloporteur était du dioxyde de carbone sous pression et un circuit secondaire comportant un cycle de Rankine assez classique, à ceci près qu'une partie de la vapeur générée était utilisée directement pour produire de l'énergie mécanique entraînant les soufflantes au CO₂ du circuit primaire [6]. Cet usage d'une fraction de la vapeur du circuit secondaire à d'autres fins que la production électrique pour le réseau a été considéré dans certains réacteurs à haute température (c'était le cas du réacteur de Fort Saint Vrain aux Etats-Unis [7]). Il est intéressant de noter qu'en situation hors-nominale, de la vapeur supplémentaire pouvait être produite pour alimenter ces turbo-soufflantes. On retrouve également cette possibilité d'utilisation de vapeur pour entraîner des turbopompes en situation accidentelle dans certains concepts de réacteurs à eau.

4. Utilisation de la vapeur à des fins autres que la production d'électricité par les centrales nucléaires

La plupart des centrales nucléaires installées actuellement sont électrogènes, c'est-à-dire dédiée à la production d'électricité. Il existe toutefois des cas particuliers non-électrogènes tels que la centrale de Madras utilisant de la vapeur et de l'électricité en vue de dessaler l'eau de mer [8].

Il existe encore d'autres exemples tels que la centrale de Beznau en Suisse [9] dédiée au chauffage urbain. On peut mentionner aussi des projets de cogénération industrielle en vue de la production d'hydrogène par électrolyse. Plus généralement, d'autres réalisations et projets variés et innovants voient le jour dans le monde dans un contexte de décarbonation de divers usages de l'énergie.

5. Vapeur mais pas vapeur d'eau : valorisation de la chaleur fatale

Tout ce qui a été décrit précédemment n'a traité que de l'eau. L'eau possède d'excellentes propriétés physico-chimiques et thermodynamiques, mais n'est pas nécessairement le fluide « idéal » pour tous les niveaux de pression et de température. Il s'agit ici d'évoquer d'autres fluides de travail potentiellement intéressants, notamment pour la récupération d'énergie dite de « basse température », avoisinant typiquement la centaine de degrés Celsius. Tout procédé industriel thermique rejette de la chaleur dans l'environnement. C'est le cas de la chaleur transmise au fleuve ou à l'air ambiant in fine par les centrales nucléaires, mais aussi par tout autre type de centrale. Cette chaleur est cependant de basse qualité (c'est-à-dire difficile à exploiter) car sa température est très modeste (inférieure à 40 °C). Par conséquent, les travaux de Carnot nous enseignent que l'usage de cette chaleur se ferait nécessairement à un rendement vraiment très bas; cette voie d'exploitation de calories à une température aussi modeste n'est pas réellement envisagée, mais il est intéressant de mentionner quelques déclinaisons plus subtiles.

Une variante des cycles de Rankine décrits précédemment a vu le jour avec la visée de récupérer une partie de la chaleur « fatale » industrielle [10], actuellement non valorisée. Il s'agit des cycles de Rankine à fluides organiques (ORC). Certains fluides organiques ont pour caractéristique de se vaporiser à basse température. La turbine en aval du générateur de vapeur travaille ensuite avec de la vapeur de fluide organique et non plus de la vapeur d'eau. De tels cycles ont atteint une grande maturité technologique et sont déployés dans le monde pour la valorisation de chaleur fatale industrielle ou pour la production d'électricité à partir d'une ressource renouvelable (solaire, géothermie, biomasse). Concernant les applications aux réacteurs nucléaires, différents types de configurations ont pu être étudiées conceptuellement. Certaines cascades entre cycle de Rankine classique et cycle de Rankine à fluide organique (ou parfois à l'ammoniac) permettraient d'augmenter le rendement électrique global [11], mais n'ont pas vu le jour industriellement. On trouve également des utilisations possibles de ces cycles de Rankine à fluide organique (ou parfois au dioxyde de carbone) dans le but d'améliorer la résilience des réacteurs nucléaires en cas d'incident amenant à une perte d'alimentation électrique [12].

Déclaration d'intérêts

Les auteurs ne travaillent pas, ne conseillent pas, ne possèdent pas de parts, ne reçoivent pas de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et n'ont déclaré aucune autre affiliation que leurs organismes de recherche.

Références

- [1] P. MORIN, *Visite du musée des Arts et Métiers avec les élèves de Terminale S*. En ligne sur <http://visite.artsetmetiers.free.fr> (consulté le 26 mars 2024).
- [2] D. FAVRAT, *L'énergie dans tous ses états*, 2002. En ligne sur https://www.econologie.com/file/technologie_energie/energie_sec_favrat.pdf (consulté le 26 mars 2024).
- [3] S. CARNOT, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, Bachelier, Libraire, Paris, 1824.
- [4] H. D. NGUYEN, N. ALPY and D. HAUBENSACK, « Insight on electrical and thermal powers mix with a Gen2 PWR : Rankine cycle performances under low to high temperature grade cogeneration », *Energy* **202** (2020), article no. 117518.
- [5] P. BOULINIER, « Les surgénérateurs », in *Collection du Commissariat à l'énergie atomique (CEA)*, Librairie Eyrolles : Paris, 1987.
- [6] R. LHEUREUX and A. AGUILERA, « Safety criteria and provisions for the evacuation of residual heat from graphite gas cooled reactors », in *IAEA Specialists' Meeting on Decay Heat Removal and Heat Transfer Under Normal and Accident Conditions in Gas Cooled Reactors, LAEA-TECDOC-757, Jülich, Germany, 6–8 July, 1992*, p. 30-41.

- [7] G. MELESE and R. KATZ, *Thermal and Flow Design of Helium-Cooled Reactors*, ANS Press, La Grane Park, 1984.
- [8] M. FISHER, A. CONSTANTIN and J. LIU, « Au-delà de la production d'électricité : l'électronucléaire au service des applications non électriques », IAEA - Agence internationale de l'énergie atomique (8 décembre 2021). En ligne sur <https://www.iaea.org/fr/newscenter/news/au-delà-de-la-production-delectricite-lelectronucleaire-au-service-des-applications-non-electriques> (consulté le 26 mars 2024).
- [9] Axpo, *Nuclear Power Plant Beznau : Reliable, environmentally compatible electricity production*, 2021. En ligne sur https://www.axpo.com/content/dam/axpo19/master/files-master/dossiers/beznau-power-plant/Axpo_KKB_Broschuere_EN_12_2021.pdf (consulté le 26 mars 2024).
- [10] N. TAUVERON, S. COLASSON and A. GRUSS, « Available systems for the conversion of waste heat to electricity », in *Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, IMECE2014, Montreal, Quebec, Canada, 8–13 November, 2014*.
- [11] B. LIU, *Modélisation d'un cycle de production d'électricité bi-étagé à aéro-réfrigérant sec*, thèse de doct., École nationale supérieure des Mines de Paris : Paris (France), 2014. En ligne sur <https://pastel.hal.science/pastel-01069070> (consulté le 26 mars 2024).
- [12] G. LHERMET, N. TAUVERON, N. CANEY and F. MORIN, « Experimental results of an Organic Rankine Cycle (ORC) associated to a passive heat removal system for advanced pressurized water reactors (PWR) », in *Proceedings of ICAPP, 2023*. Preprint no. cea-04389217 en ligne sur <https://cea.hal.science/cea-04389217v1> (consulté le 26 mars 2024).