

DS n°2

PSI 2021/2022

Durée 4 heures - Calculatrices **autorisées**

Thermodynamique - Statique des fluides - Chimie

I. — Etude du circuit secondaire d'un réacteur à eau pressurisée (CCP)

Les réacteurs nucléaires à eau pressurisée (REP) exploitent l'énergie libérée par la fission de noyaux d'uranium 235 provoquée par des flux de neutrons pour chauffer l'eau d'un premier circuit appelé circuit primaire. Ce dernier va transférer son énergie thermique, via un échangeur appelé générateur de vapeur, à un deuxième circuit : le circuit secondaire. L'eau du secondaire subit un cycle thermodynamique qui consiste en une vaporisation au niveau de la source chaude, une détente de la vapeur dans une turbine (reliée à un alternateur qui va produire de l'électricité), une condensation de la vapeur sortant à basse pression de la turbine et une compression de l'eau condensée afin de ramener cette eau à la pression initiale.

Ce problème a pour objectif d'étudier des aspects thermodynamiques du circuit secondaire et ce, systématiquement, en régime permanent.

Données :

| Pression de vapeur saturante (bar) 1 bar = 10 ⁵ Pa | enthalpies massiques (kJ.kg ⁻¹) | | entropies massiques (kJ.K ⁻¹ .kg ⁻¹) | |
|--|---|---|---|---|
| | à l'état de liquide saturant : h' | à l'état de vapeur saturante : h'' | à l'état de liquide saturant : s' | à l'état de vapeur saturante : s'' |
| 0,05 | 137,8 | 2 561,6 | 0,4763 | 8,3960 |
| 10 | 762,6 | 2 776,2 | 2,1382 | 6,5828 |
| 70 | 1 267,4 | 2 773,5 | 3,1219 | 5,8162 |

On rappelle que l'enthalpie massique h d'un mélange diphasique de titre massique en vapeur x est donnée par la relation : $h = x.h'' + (1 - x).h'$, où h'' et h' sont respectivement les enthalpies massiques à l'état de vapeur saturante et à l'état de liquide saturant. Par ailleurs, l'entropie massique s d'un mélange diphasique de titre x est donnée par la relation : $s = x.s'' + (1 - x).s'$, où s'' et s' sont respectivement les entropies massiques à l'état de vapeur saturante et à l'état de liquide saturant.

Le circuit secondaire est constitué du générateur de vapeur (G.V.), d'une turbine (T) reliée à un alternateur, d'un condenseur (C) et d'une pompe d'alimentation secondaire (P), comme précisé en figure 1.

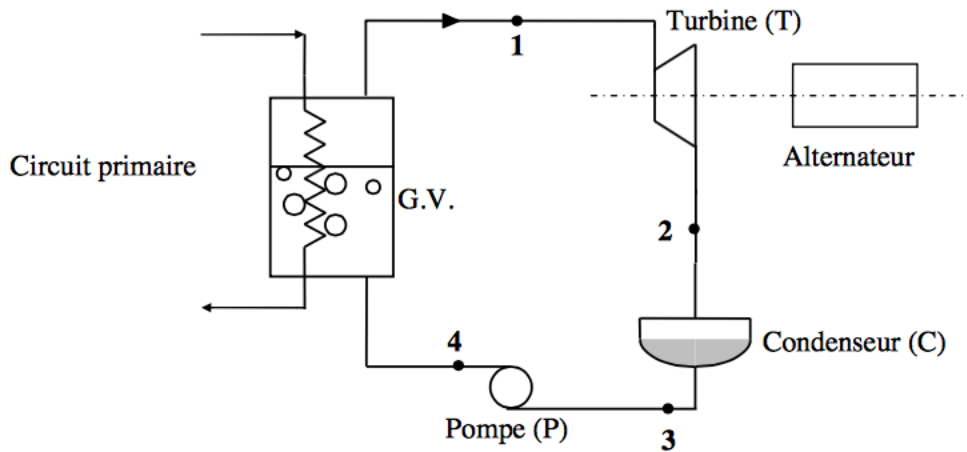


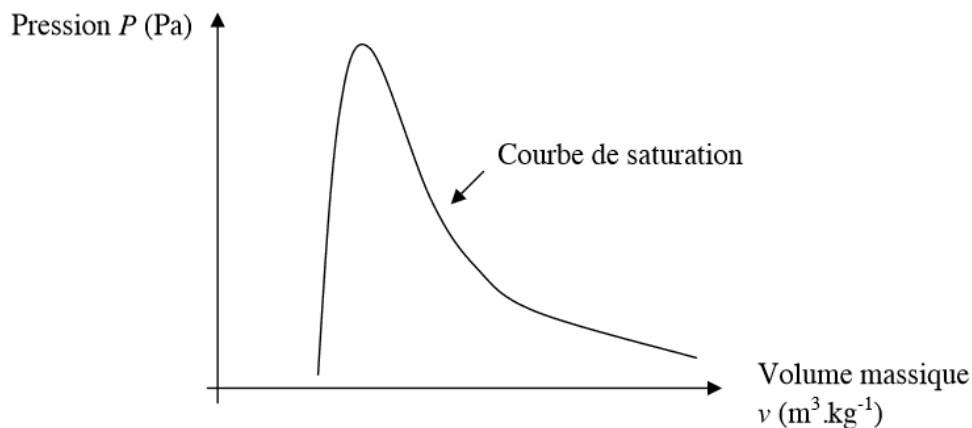
Figure 1 : circuit secondaire simplifié

FIGURE 1 – circuit secondaire simplifié

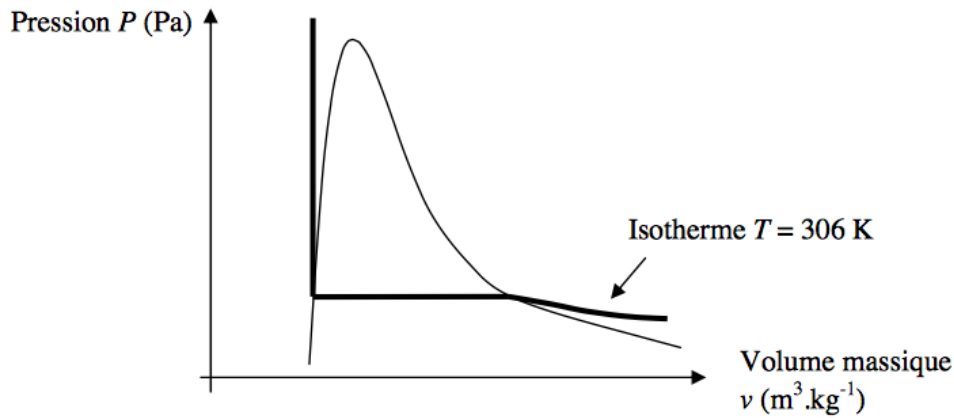
Pour l'ensemble du problème, nous négligerons les frottements ainsi que les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle du fluide secondaire. L'expression du premier principe pour une masse $m = 1$ kg de fluide en écoulement au travers d'une machine est : $\Delta h = w_i + q_e$, où Δh représente la différence $h_s - h_e$ entre les enthalpies massiques (en kJ.kg^{-1}) du fluide à la sortie h_s et à l'entrée h_e de la machine, w_i le travail massique indiqué, c'est-à-dire le travail massique (en kJ.kg^{-1}) échangé entre une masse $m = 1$ kg de fluide et les parois mobiles de la machine, q_e le transfert thermique entre le kilogramme de fluide et la machine (en kJ.kg^{-1}). Dans le condenseur et le générateur de vapeur il n'y a pas de pièce mobile.

I.A. — Questions préliminaires

□ 1 — Sur le diagramme de Clapeyron ci-dessous que vous reproduirez, préciser la position du point critique, les parties courbes de rosée et d'ébullition. Indiquer également les domaines du liquide, du mélange diphasique et de la vapeur. Mentionner où se trouve le liquide saturant et la vapeur juste saturante.



□ 2 — Sur le diagramme de Clapeyron de la figure ci-dessous, l'allure de l'isotherme correspondant à la température $T = 306$ K a été représentée. Justifier l'allure de cette isotherme pour chaque domaine. On pourra, dans le domaine de la vapeur surchauffée, se référer au modèle du gaz parfait. Tracer l'allure de l'isotherme correspondant à la température $T = 559$ K sur un diagramme de Clapeyron que vous reproduirez et où apparaît l'allure de l'isotherme correspondant à la température $T = 306$ K.



- 3 — Démontrer qu'une transformation adiabatique réversible est une transformation isentropique.
- 4 — En considérant que l'eau liquide dans une pompe est incompressible et de volume massique $v = 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, calculer le travail massique indiqué w_{iP} échangé par l'eau circulant dans une pompe, en considérant la transformation adiabatique réversible et une augmentation de pression de $\Delta P = 70 \text{ bar}$. On rappelle que la variation élémentaire de l'enthalpie massique dh du fluide peut s'écrire : $dh = Tds + v dP$. Ce travail peut être considéré comme négligeable devant les autres échanges énergétiques; dans toute la suite du problème, le travail indiqué échangé par un liquide sera systématiquement considéré comme nul. En déduire alors, que l'enthalpie massique du liquide reste constante lors de son passage dans une pompe.

I.B. — Etude du cycle secondaire simplifié

Le fluide secondaire subit le cycle thermodynamique suivant :

- 1 → 2 : détente adiabatique réversible dans la turbine,
- 2 → 3 : liquéfaction isobare totale dans le condenseur,
- 3 → 4 : compression adiabatique réversible dans la pompe d'alimentation secondaire,
- 4 → 1 : échauffement puis vaporisation isobare dans le générateur de vapeur saturante.

| Point | Pression (bar) $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ | Température (K) | Etat du fluide secondaire | Enthalpie massique ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) | Entropie massique ($\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$) |
|-------|--|--------------------|------------------------------|---|--|
| 1 | 70 | 559 | Vapeur saturante | 2 773,5 | 5,8162 |
| 2 | 0,05 | 306 | Mélange diphasique | | |
| 3 | 0,05 | | Liquide saturant | 137,8 | 0,4763 |
| 4 | 70 | | Liquide sous-saturé | | |

- 5 — Tracer dans un diagramme de Clapeyron l'allure du cycle thermodynamique subi par le fluide secondaire. Y placer notamment les points 1, 2, 3 et 4.
- 6 — Calculer, en sortie de turbine, le titre x_2 et l'enthalpie massique h_2 du fluide. En déduire le travail massique indiqué w_{iT} échangé par le fluide dans la turbine. On rappelle que le titre correspond à la fraction massique de la vapeur dans le mélange liquide-vapeur. Une vapeur humide est d'autant plus corrosive pour les pales de la turbine que son titre est faible, que pensez-vous de la détente étudiée?
- 7 — Déterminer la température T_3 et la valeur du titre x_3 du fluide en sortie du condenseur. Calculer la chaleur massique q_{eC} échangée par le fluide avec le condenseur.

- 8 — Calculer la chaleur massique q_{eGV} échangée par le fluide dans le générateur de vapeur.
- 9 — Calculer le rendement de ce cycle thermodynamique η puis celui de Carnot η_C en utilisant les mêmes sources chaude et froide. D'où provient la différence de rendement entre ces cycles?

II. — Etude de quelques aspects de l'humidité de l'air (G2E)

Dans ce problème, on s'intéresse aux différents aspects de l'humidité de l'air.

Dans toute la suite, les gaz et les vapeurs, même saturantes, sont supposés parfaits. L'air humide sera considéré comme un mélange d'air sec de masse molaire $M_a = 29 \text{ g.mol}^{-1}$ et de vapeur d'eau de masse molaire $M_e = 18 \text{ g.mol}^{-1}$.

On donne : $R = 8,3 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$. On rappelle qu'à l'ordre un en ϵ : pour $\epsilon \ll 1$, $\ln(1 + \epsilon) \approx \epsilon$, $(1 + \epsilon)^a \approx 1 + a\epsilon$, $e^\epsilon \approx 1 + \epsilon$.

II.A. — Pression de vapeur saturante

On s'intéresse à l'équilibre eau liquide - eau vapeur.

- 1 — Comment varie la pression d'un mélange liquide-vapeur évoluant à température constante lors d'un changement d'état?

- 2 — On admet que l'enthalpie massique de vaporisation $\Delta h = h_V - h_L = \ell_v$ vérifie la relation dite de Clapeyron :

$$\ell_v = T(\nu_V - \nu_L) \frac{dP_s}{dT}(T)$$

où ν_V et ν_L sont les volumes massiques respectivement de la vapeur saturante et du liquide saturant, et $P_s(T)$ la pression de vapeur saturante à la température T . On suppose que ℓ_v est indépendante de la température et que $\nu_L \ll \nu_V$.

- a) Justifier l'approximation $\nu_L \ll \nu_V$ en comparant numériquement le volume massique d'un gaz dans les conditions normales de température et de pression et celui de l'eau liquide.

- b) On suppose $P_s(T_0) = P^0$ avec $T_0 = 373 \text{ K}$ et $P^0 = 10^5 \text{ Pa}$. A partir de la relation de Clapeyron, démontrer la relation approchée dite de Rankine :

$$\ln P_s = A - \frac{B}{T}$$

avec A et B des constantes :

$$A = \ln P^0 + \frac{M_e \ell_v}{R} \frac{1}{T_0}, \quad B = \frac{M_e \ell_v}{R}$$

T_0 est la température d'ébullition de l'eau sous P^0 .

- 3 — On prendra pour la suite : $A = 13,28$ et $B = 4952 \text{ K}$ avec P_s en bars et T en K. Calculer numériquement P_s pour les températures 278 K et 300 K, ainsi que ℓ_v .

II.B. — Enthalpie de vaporisation

Un récipient calorifugé contient de l'eau. Il est placé sur une balance monoplateau (Figure 3). Un thermoplongeur de puissance $P = 350 \text{ W}$ est immergé dans le récipient et porte l'eau à ébullition donc à 100°C sous la pression de 1 bar approximativement. La balance permet de mesurer la masse m d'eau évaporée pendant la durée t , à partir de l'ébullition. La puissance thermique perdue, qui ne sert pas à chauffer l'eau, est supposée constante et notée Φ .

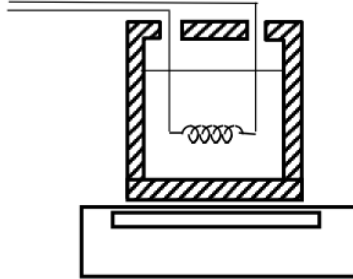


FIGURE 2 – Récipient calorifugé

□ 4 — Etablir la relation entre l'enthalpie de vaporisation ℓ_V , m , Φ , t et P .

□ 5 — On réalise une première expérience qui permet de mesurer $m = m_1 = 21 \text{ g}$ pour $t = 3 \text{ min}$. Dans une deuxième expérience, on ajoute dans le récipient un deuxième thermoplongeur identique au précédent et on obtient $m = m_2 = 49 \text{ g}$ pour la même durée t .

a) Exprimer ℓ_V en fonction de P , t , m_2 et m_1 .

b) En déduire la valeur de l'enthalpie de vaporisation ℓ_V et comparer à la valeur obtenue à la question I.A.3. On pourra calculer un écart relatif entre ces deux valeurs.

III. — Formation et stabilité d'un nuage

On s'intéresse à l'équilibre de l'air dans l'atmosphère terrestre.

Les valeurs de référence pour la température et la pression seront celles relevées à la surface de la Terre, à savoir $P_0 = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ et $T_0 = 300 \text{ K}$. L'air sera assimilé à un gaz parfait.

On repère ici l'espace par le trièdre (O, x, y, z) . L'axe des z vertical est dirigé vers le haut et son origine O coïncide avec la surface de la Terre.

A.1 - Equilibre isotherme de l'atmosphère

On suppose ici que la température de l'atmosphère est uniforme et vaut T_0 pour tout z .

On note $\rho_{\text{air}}(z)$ la masse volumique de l'air à l'altitude z .

1) On note M_{air} la masse molaire de l'air. Quels sont les deux principaux constituants physico-chimiques de l'air ? En quelles proportions molaires y sont-ils présents ? En ne considérant que ces deux principaux constituants de l'air, déterminer la valeur numérique de M_{air} .

- 2) En écrivant une condition d'équilibre mécanique sur un élément infinitésimal d'atmosphère situé entre les altitudes z et $z + dz$, montrer que : $\frac{dP}{dz} = -\rho_{\text{air}} g$.
- 3) Déterminer l'expression de la pression $P(z)$ de l'air en fonction de l'altitude z .
- 4) En déduire un ordre de grandeur de l'épaisseur caractéristique de l'atmosphère.

A.2 - Equilibre de l'atmosphère caractérisée par un gradient de température et formation de la base du nuage

La température dans les basses couches de l'atmosphère n'est pas uniforme mais décroît avec l'altitude. Dans cette partie, on admettra que cette température suit une décroissance affine de la forme : $T(z) = T_0 - \lambda z$ avec $T_0 = 300 \text{ K}$ et $\lambda = 0,007 \text{ K.m}^{-1}$.

- 5) a) A partir de la condition d'équilibre mécanique d'un élément infinitésimal d'atmosphère, déterminer l'expression littérale de $P(z)$.
- b) Les applications numériques donnent :

| | | | | | | |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Altitude (km) | 0,5 | 2 | 5 | 8 | 11 | 14 |
| Pression (Pa) | 94 500 | 79 300 | 54 800 | 36 700 | 23 700 | 14 600 |

Jusqu'à quelle altitude et avec quelle précision, le modèle de l'atmosphère isotherme est-il pertinent ?

A.3 - Profil de température au sein d'une colonne d'air humide à toutes les altitudes, formation du nuage

D'un point de vue thermodynamique, l'ascension verticale d'une colonne d'air humide, depuis la surface de la Terre à la pression P_0 , jusqu'à l'altitude z à la pression $P(z)$, sera assimilée à une détente adiabatique et mécaniquement réversible. Par ailleurs, l'air humide contenant une faible quantité de vapeur d'eau sera encore assimilable à un gaz parfait de masse molaire M_{air} .

- 6) Ecrire le système d'équations permettant de déterminer le profil de température $T(z)$ au sein d'une colonne d'air humide, en équilibre mécanique, pour toutes les altitudes.

La résolution des équations précédentes aboutit à l'expression :

$$T(z) = T_0 \left(1 - \frac{z}{z_2}\right) \text{ avec } z_2 = \frac{\gamma R T_0}{(\gamma - 1) M_{\text{air}} g}.$$

- 7) a) Par extrapolation, évaluer la pression de vapeur saturante de l'eau à l'altitude $z = 500 \text{ m}$.
- b) En supposant que la fraction molaire de l'eau dans la colonne d'air humide est de 4 %, montrer que l'eau devrait se liquéfier en dessous de 500 m.
- c) En général, les observations rendent compte d'une liquéfaction survenant à des altitudes légèrement supérieures. Expliquer. Ce phénomène de métastabilité existe aussi pour des corps très purs lors du changement d'état liquide-solide. Dans ce dernier cas, quel nom lui est associé ?

IV. — Combustion du bois (Centrale)

Un solide, en particulier le bois, passe par plusieurs phases au cours de son échauffement avant de brûler, avec apparition des flammes. D'abord l'eau qu'il contient s'évapore autour de 100°C à la pression atmosphérique, puis les constituants du bois commencent à se décomposer; il s'agit du phénomène de pyrolyse, généralement observé entre 250°C et 500°C , qui conduit à la formation de gaz. C'est une partie de l'énergie dégagée par la combustion de ces gaz de pyrolyse dans le dioxygène de l'air qui permet de perpétuer l'ensemble de ces étapes. Lorsque le processus de pyrolyse est terminé et qu'il n'y a plus de substances volatiles, il subsiste un résidu charbonneux rougeoyant qui dégage encore beaucoup d'énergie, sa surface extérieure atteignant 800°C . Le bois de chêne est composé principalement d'environ 25 % de lignine ($\text{C}_{40}\text{H}_{44}\text{O}_6$) et 75 % de carbohydrates $\text{C}_n(\text{H}_2\text{O})_m$ (cellulose ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$)_p et hemicellulose).



Figure 1 Différentes phases de combustion du bois¹

□ 1 — Une analyse élémentaire a fourni les pourcentages massiques respectifs en élément carbone, hydrogène et oxygène de 50 %, 6 % et 44 %. On rappelle que le pourcentage massique en élément X est défini par $w_X = \frac{m_X}{m_{\text{tot}}}$. Montrer que, si le bois pouvait être considéré comme un corps pur, sa formule chimique serait $\text{CH}_{1,44}\text{O}_{0,66}$. Dans la suite, on assimilera le bois à un corps pur de formule chimique brute $\text{CH}_{1,44}\text{O}_{0,66}$.

□ 2 — Écrire l'équation-bilan de la réaction de combustion du bois avec l'oxygène de l'air. La combustion est supposée complète et conduire à la formation de CO_2 et H_2O .

□ 3 — On appelle pouvoir calorifique inférieur (PCI) l'énergie dégagée par la combustion complète d'un kilogramme de combustible à pression constante, l'eau produite étant sous forme de vapeur. Pour le chêne, on mesure un PCI de $19 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Quelle serait la valeur numérique de l'enthalpie de réaction de cette combustion?

□ 4 — En admettant que la pyrolyse du bois libère du dihydrogène H_2 , du monoxyde de carbone CO et du carbone solide, écrire la réaction de pyrolyse d'une mole de bois. Écrire ensuite la réaction de la combustion des gaz de pyrolyse produits dans le dioxygène de l'air (on fera attention à conserver les mêmes quantités de matière). Retrouver, à partir des données tabulées, la valeur de l'enthalpie standard de réaction de la combustion des gaz de pyrolyse. Conclure.

□ 5 — Dans une pièce calorifugée et fermée, initialement à 20°C et de capacité thermique totale de l'ordre de $6,0 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$, brûle une buche de bois de chêne de 1 kg. Quelle est la température maximale atteinte dans la pièce? Commenter.

| Espèces | $\Delta_f H^\circ$ (kJ·mol ⁻¹) |
|---------------------------------|--|
| H _{2(g)} | 0 |
| O _{2(g)} | 0 |
| H ₂ O _(l) | -285,1 |
| H ₂ O _(g) | -241,8 |
| C _(graphite) | 0 |
| CO _(g) | -110,6 |
| CO _{2(g)} | -393,5 |

| Élément | H | C | O |
|--------------------------------------|-----|------|------|
| Numéro atomique | 1 | 6 | 8 |
| Masse molaire (g·mol ⁻¹) | 1,0 | 12,0 | 16,0 |

V. — Résolution de problème : enjeux énergétiques

Pour diminuer les émissions de CO₂ engendrées par le transport routier, il est envisagé, à terme, de remplacer par des véhicules électriques l'ensemble des véhicules à moteur thermique utilisés par les particuliers.

□ 1 — Calculer le supplément de consommation énergétique annuelle que cette conversion au tout électrique occasionnerait. Cela demanderait-il de créer de nouvelles unités de production d'électricité?

Document 1

Le tableau ci-dessous concerne les voitures particulières en circulation en France métropolitaine pendant l'année 2017.

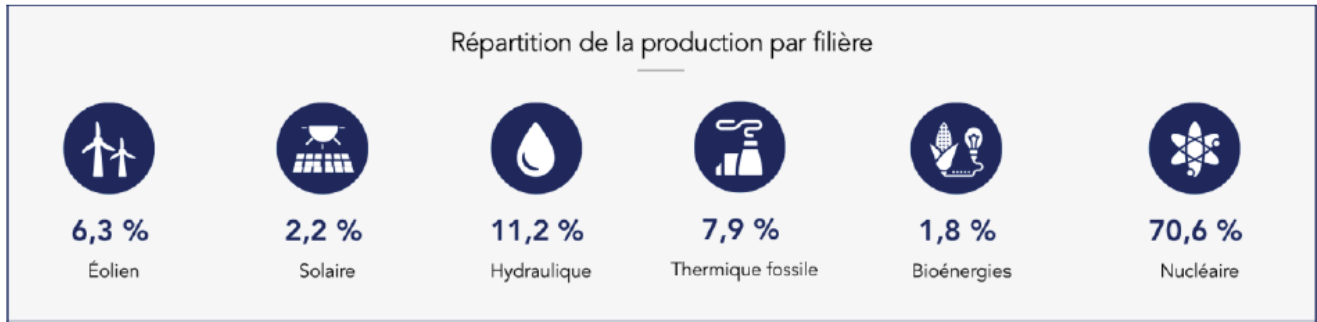
| | <i>Essence</i> | <i>Diesel</i> |
|--------------------------|----------------|---------------|
| Nombre | 12,7 millions | 19,8 millions |
| Kilométrage annuel moyen | 8935 km | 15 910 km |
| Consommation moyenne | 7,3 L/100 km | 6,1 L/100 km |

Avec 43,8 Mtep consommées en 2016, le secteur des transports représente une part croissante de la consommation d'énergie finale de la France : 31 % en 2015 contre 27 % en 1990 et 15 % en 1970. Le transport routier représente à lui seul plus de 80 % des consommations finales en énergie du secteur des transports, largement devant le transport aérien (15 %) et ferroviaire (~ 2 %) et la navigation intérieure (0,4 %). Les consommations du secteur routier proviennent principalement des voitures particulières (62 %), les véhicules utilitaires légers et les camions ne représentant respectivement que 20 % et 14 % des consommations finales d'énergie des transports routiers.

ADEME, *Climat Air et Énergie – Chiffres clés*, édition 2018

Document 2

La production totale d'électricité en France s'établit à 537,7 TW·h sur l'année 2019, répartie comme indiqué dans le schéma ci-dessous :

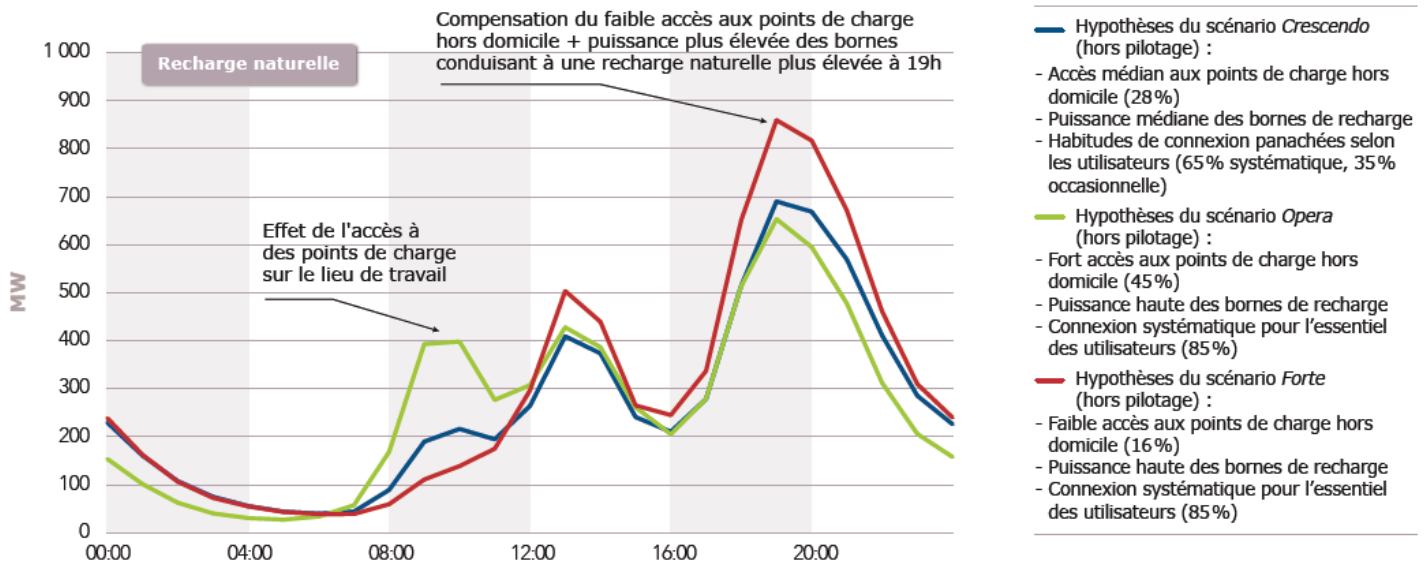


Les pertes représentent principalement l'énergie dissipée par effet Joule lors du transport sur le réseau haute et très haute tension. Elles dépendent essentiellement de la consommation, du plan de production et des échanges transfrontaliers. Les taux de pertes sur le réseau de transport sont compris entre 2 et 3,5 % de la consommation, suivant les saisons et les heures de la journée. En moyenne, en 2019, le taux s'établit à 2,22 %, ce qui représente environ 11 TW·h.

RTE, *Bilan électrique 2019*

Document 3

RTE a étudié l'impact de différents scénarios de développement de l'électromobilité sur le système électrique français. La figure ci-dessous présente la courbe de charge type pour un jour ouvré moyen pour un million de véhicules électriques dans différents scénarios considérés (dans leurs variantes sans pilotage).



RTE, *Enjeux du développement de l'électromobilité pour le système électrique*, mai 2019