



MINISTÈRES
ÉDUCATION
JEUNESSE
SPORTS
ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR
RECHERCHE

Liberté
Égalité
Fraternité

Académie de Grenoble

LYCEE DES METIERS LA PLÉIADE

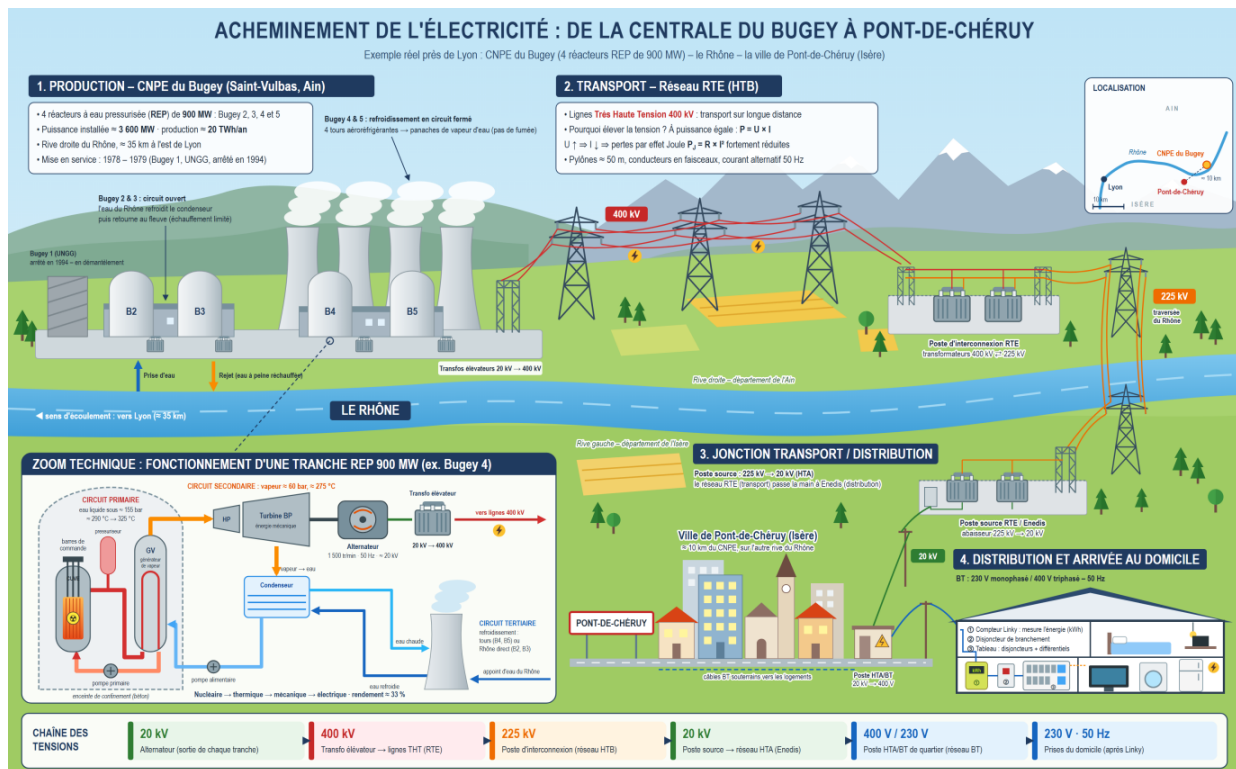
Pont de Cheruy



Les sources d'énergie

Terminale AC – ITEC – EE – SIN

La centrale du Bugey



Partie 2 – La centrale du Bugey : du noyau d'uranium à la prise de Pont-de-Chéruy

Terminale

Les sources d'énergie

Cours

Partie 2 : la centrale du Bugey, de l'atome à la prise

Objectifs :	– Présenter le CNPE du Bugey : situation géographique, histoire, réacteurs, modes de refroidissement, sûreté. – Expliquer la fission de l'uranium 235, la réaction en chaîne et son pilotage dans un réacteur à eau pressurisée (REP). – Décrire les trois circuits d'un REP et la chaîne de conversion : nucléaire → thermique → mécanique → électrique. – Justifier par le calcul le transport de l'électricité en très haute tension (pertes par effet Joule). – Expliquer le rôle des transformateurs, du poste source et du réseau de distribution jusqu'à Pont-de-Chéruy. – Calculer énergies, puissances, rendements, coûts et masses de combustible (16 calculs types, méthode attendue au bac).
Compétences visées	Programme de 2I2D (ingénierie, innovation et développement durable), classe terminale STI2D : arrêté du 17 janvier 2019 – BO spécial n°1 du 22 janvier 2019 (NOR MENE1901591A), annexe 1. Chapitre du tronc commun aux quatre enseignements (AC, ITEC, EE, SIN). Compétences du programme (BO) : C01.1 Justifier les choix des structures matérielles et/ou logicielles d'un produit, identifier les flux mis en œuvre dans une approche de développement durable. → <i>flux d'énergie de la fission jusqu'à la prise</i> C01.3 Justifier les solutions constructives d'un produit au regard des performances environnementales et estimer leur impact sur l'efficacité globale. → <i>rendements, pertes Joule, refroidissement, rendement global</i> C02.2 Évaluer la compétitivité d'un produit d'un point de vue technique et économique. → <i>comparaison uranium / charbon, coût de l'énergie au domicile</i> C03.1 Identifier et caractériser les fonctions et les constituants d'un produit ainsi que ses entrées/sorties. → <i>constituants d'un REP, d'un poste source, d'un tableau électrique</i>
Connaissances associées (BO)	1.5.2 Mise à disposition des ressources : enjeux énergétiques mondiaux, production centralisée ou locale 1.5.3 Utilisation raisonnée des ressources : efficacité énergétique d'un produit 2.1 Représentation des flux MEI : flux et stocks d'énergie, caractérisation et unités 2.3.1 à 2.3.3 Chaînes de puissance : typologie, stockage d'énergie, conversion de puissance 3.3 Comportement énergétique des produits : conservation de l'énergie, pertes et rendements, sources d'énergie, bilan énergétique
Durée	4 h de cours + 3 h de TP
Discipline	AC – ITEC – EE – SIN
Notation Pronote	Évaluation du TP associé (20 points)
Coefficient	1

CHAPITRE

02

COURS · TERMINALE STI2D · 212D

La centrale du Bugey

Du noyau d'uranium à la prise de Pont-de-Chéruy

LE FIL ROUGE DU CHAPITRE

- Uranium 235
noyau fissile
- Fission
chaleur
- Vapeur
turbine
- Alternateur
20 kV
- RTE
400 kV
- Répartition
225 kV
- Poste source
20 kV
- Prise
230 V

LA QUESTION DU CHAPITRE

« Quand on branche un chargeur dans une salle du lycée La Pléiade, d'où vient l'énergie, par quel chemin arrive-t-elle, et **combien d'uranium** a-t-il fallu fissionner au Bugey, à 9 km de là, pour l'obtenir ? »

JE SERAI CAPABLE DE...

- ☐ Situer le CNPE du Bugey, raconter son histoire et décrire ses deux modes de refroidissement.
- ☐ Écrire une équation de fission, vérifier les lois de conservation et calculer l'énergie libérée ($E = \Delta m \cdot c^2$).
- ☐ Décrire le rôle de chaque circuit d'un REP et calculer le rendement d'une tranche.
- ☐ Calculer l'intensité et les pertes Joule d'une ligne, et justifier le choix du 400 kV.
- ☐ Utiliser le rapport de transformation et calculer le rendement d'un transformateur.
- ☐ Calculer la puissance, l'énergie et le coût au domicile, puis remonter jusqu'à la masse d'uranium.

Cochez chaque case quand la compétence est acquise.

AU PROGRAMME

- I Le CNPE du Bugey : présentation et histoire**
situation · pourquoi ici ? · frise historique · le site aujourd'hui · sûreté
- II Produire : de la fission à l'alternateur**
uranium et enrichissement · fission · réaction en chaîne · 3 circuits · calculs 1 à 4
- III Transporter : le réseau RTE en très haute tension**
triphasé · résistance d'une ligne · pertes Joule · pourquoi 400 kV · calculs 5 à 8
- IV Le poste source : du transport à la distribution**
transformateur · poste source · alimentation de Pont-de-Chéruy · calculs 9 à 12
- V Arriver au domicile**
réseau BT · Linky · tableau électrique · bilan global · calculs 13 à 16
- VI Formulaire et méthode**
toutes les formules du chapitre · rédiger un calcul · synthèse

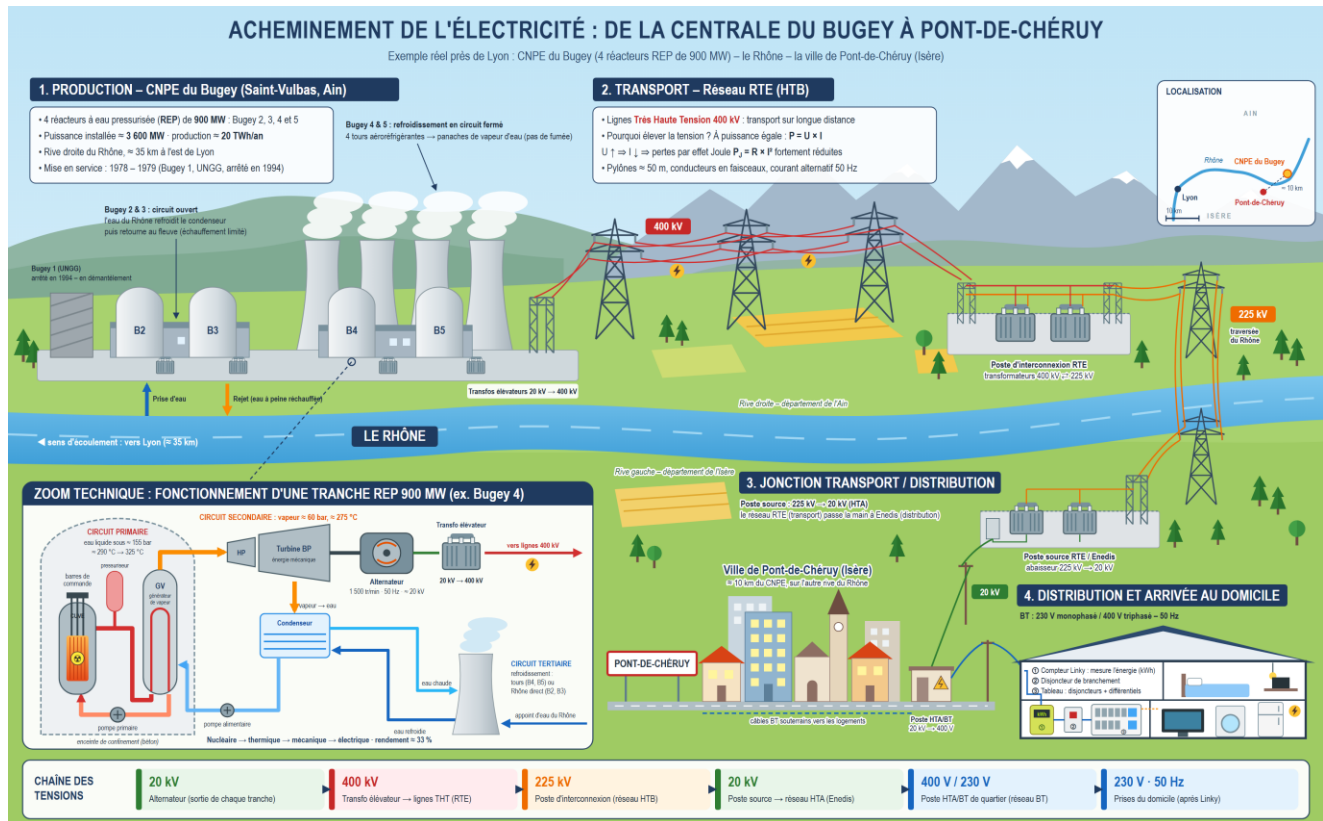


FIG. 1 Vue d'ensemble : du CNPE du Bugey jusqu'au domicile (chaque étape 1 à 4 correspond à une partie du cours).

PARTIE I

Le CNPE du Bugey : présentation et histoire

Un **CNPE** (centre nucléaire de production d'électricité) est une centrale qui transforme l'énergie contenue dans les noyaux d'uranium en électricité. Le CNPE du **Bugey** est implanté sur la commune de **Saint-Vulbas (Ain)**, sur la **rive droite du Rhône**, à environ **35 km à l'est de Lyon** et à **9 km du lycée** de Pont-de-Chéruy. Il est exploité par **EDF** ; sa sûreté est contrôlée par l'**ASN** (Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection, née en 2025 de la fusion de l'ASN et de l'IRSN).

01 Pourquoi construire une centrale ici ?

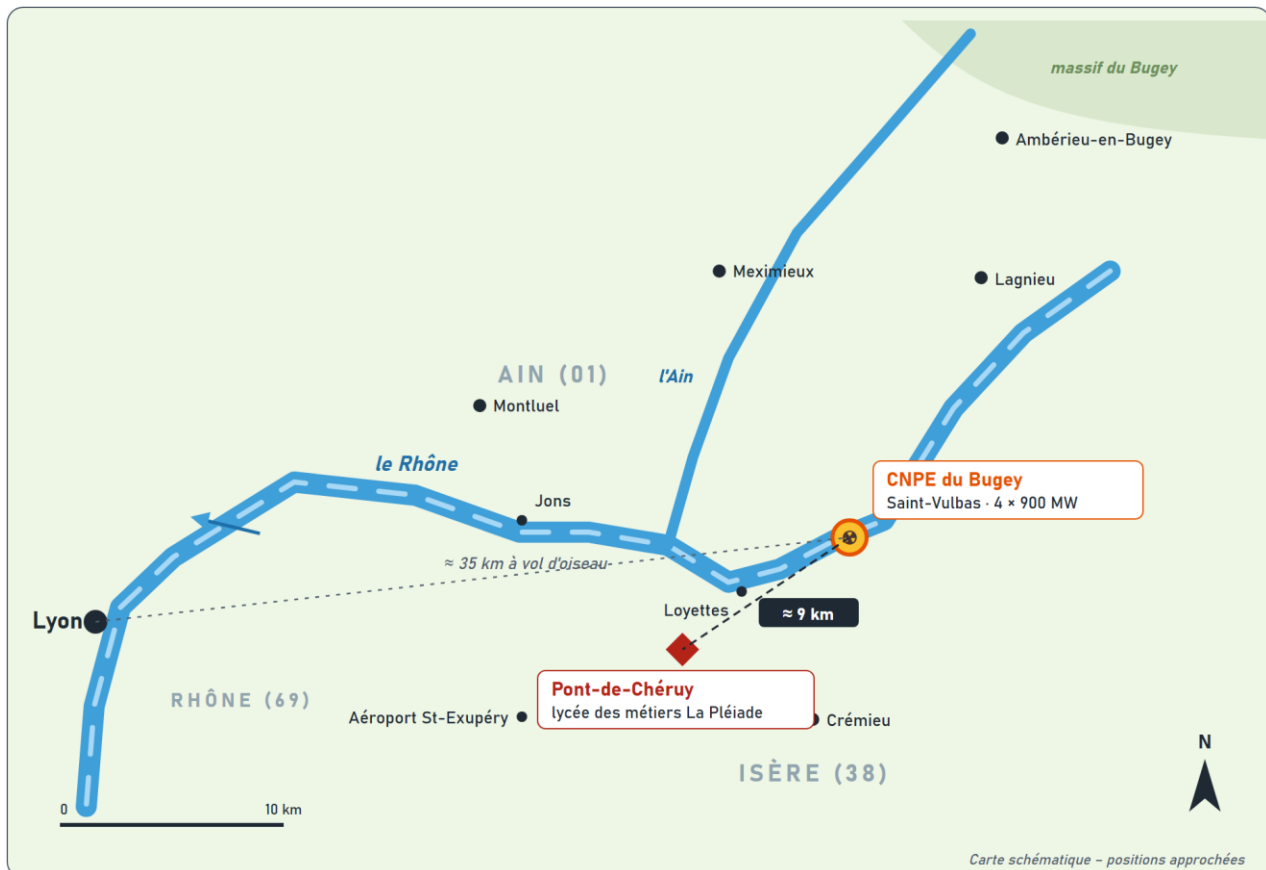


FIG. 2 Situation du CNPE du Bugey, du Rhône et de Pont-de-Chéruy (carte schématique, échelle approchée).

Le choix d'un site obéit à des critères **techniques, économiques et environnementaux** :

- **Une source froide abondante** : une centrale thermique ne transforme qu'un tiers de sa chaleur en électricité ; les deux tiers restants doivent être évacués. Le **Rhône** fournit cette eau de refroidissement.
- **La proximité des consommateurs** : l'agglomération lyonnaise, la plaine de l'Ain et la vallée industrielle du Rhône consomment beaucoup d'électricité.
- **Un terrain plat et stable**, éloigné des zones très peuplées, et l'accès au **réseau 400 kV** de RTE.

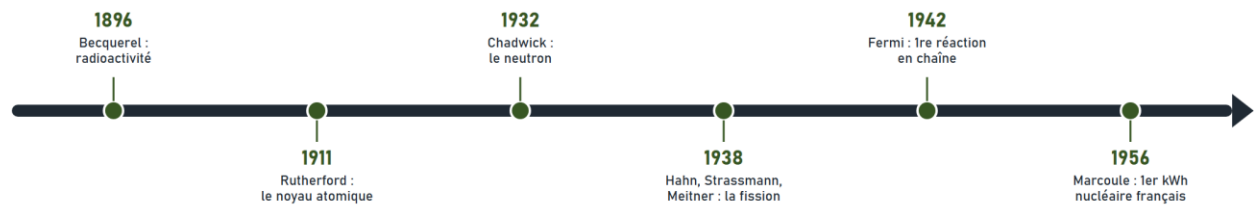
À RETENIR

Pas de centrale thermique sans source froide

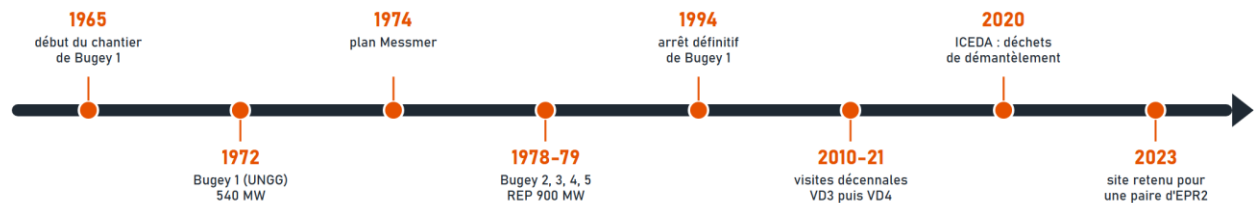
Toute centrale thermique (nucléaire, charbon, gaz) fonctionne entre une **source chaude** (le cœur du réacteur) et une **source froide** (fleuve, mer ou atmosphère). C'est une conséquence du second principe de la thermodynamique : on ne peut pas transformer toute la chaleur en travail.

02 Une histoire en deux temps

LA SCIENCE DE L'ATOME (1896 - 1956)



L'HISTOIRE DU SITE DU BUGEY (1965 - 2023)



Frise sans échelle de temps

FIG. 3 De la découverte de la radioactivité au projet EPR2 : la science de l'atome et l'histoire du site du Bugey.

Le site a connu **deux technologies** de réacteurs. **Bugey 1** (1972) était un réacteur **UNGG** (uranium naturel – graphite – gaz) de conception française, refroidi au gaz carbonique. Il a été arrêté en 1994 et il est en cours de **démantèlement**. Les **quatre réacteurs actuels** (Bugey 2 à 5), mis en service en 1978-1979, sont des **REP** (réacteurs à eau pressurisée) de **900 MW**, la technologie retenue par le **plan Messmer** de 1974 après le premier choc pétrolier.

ILS ONT FAIT L'HISTOIRE

De l'atome au réacteur

DATE	QUI / QUOI ?	CE QU'IL OU ELLE A APPORTÉ
1896	Henri Becquerel (France)	découvre que l'uranium émet spontanément un rayonnement : la radioactivité.
1898	Marie et Pierre Curie	isolent le polonium et le radium ; Marie Curie forge le mot « radioactivité ».
1932	James Chadwick (Royaume-Uni)	découvre le neutron , particule sans charge capable de pénétrer le noyau.
1938-1939	Otto Hahn, Fritz Strassmann, Lise Meitner	montrent que le noyau d'uranium se casse en deux sous l'impact d'un neutron : la fission .
1939	Frédéric Joliot-Curie et son équipe	prouvent qu'une fission libère plusieurs neutrons : la réaction en chaîne est possible.
1942	Enrico Fermi (Chicago)	réalise la première réaction en chaîne contrôlée (pile CP-1).
1956	CEA, Marcoule (Gard)	premier kilowattheure d'origine nucléaire produit en France.
1972 → 1979	EDF, Saint-Vulbas	mise en service de Bugey 1 (UNGG) puis de Bugey 2, 3, 4 et 5 (REP 900 MW).

PIÈGE À ÉVITER

Combien de réacteurs au Bugey ?

Le site compte **cinq** réacteurs construits mais **quatre** seulement produisent de l'électricité (Bugey 2 à 5) : Bugey 1 est arrêté depuis 1994. Et les **4 tours aéroréfrigérantes** ne refroidissent que **deux** réacteurs (Bugey 4 et 5, deux tours chacun) : Bugey 2 et 3 sont refroidis directement par l'eau du Rhône.

03 Le site aujourd'hui

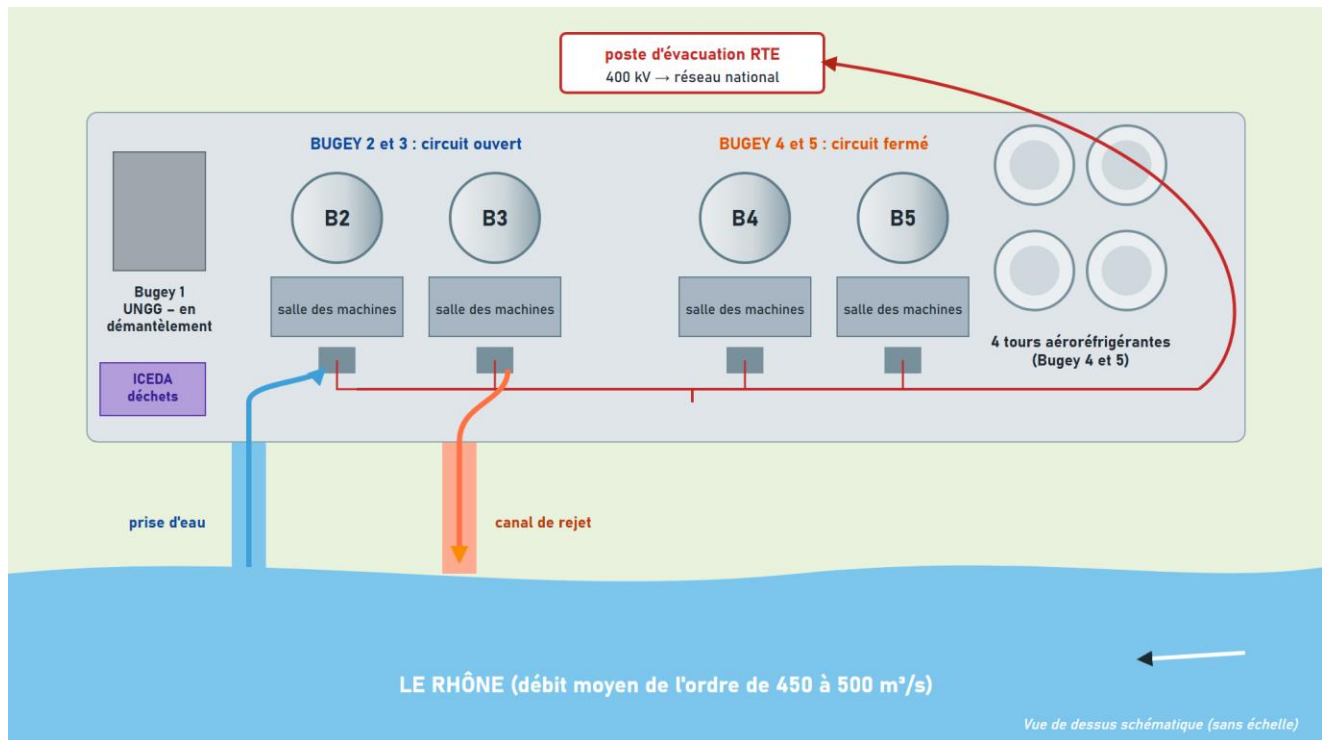


FIG. 4 Organisation schématique du site : réacteurs, salles des machines, tours, prise d'eau et poste d'évacuation.

CARACTÉRISTIQUE	VALEUR (ORDRE DE GRANDEUR)
Réacteurs en service	4 REP de 900 MW (Bugey 2, 3, 4, 5), palier « CP0 »
Puissance thermique d'un réacteur	$P_{th} \approx 2\,785\text{ MW}$
Puissance électrique d'un réacteur	$P_e \approx 900\text{ MW}$ ($\approx 3\,600\text{ MW}$ pour le site)
Production annuelle du site	≈ 20 à 24 TWh selon les arrêts pour maintenance
Combustible	oxyde d'uranium UO_2 enrichi à $\approx 4\%$ en uranium 235
Refroidissement	Bugey 2 et 3 : circuit ouvert sur le Rhône · Bugey 4 et 5 : circuit fermé + 4 tours
Raccordement	réseau de transport RTE en 400 kV
Contrôle	visites décennales (tous les 10 ans) sous le contrôle de l'ASNR

04 La sûreté : trois barrières

Les trois barrières qui séparent les produits radioactifs de l'environnement

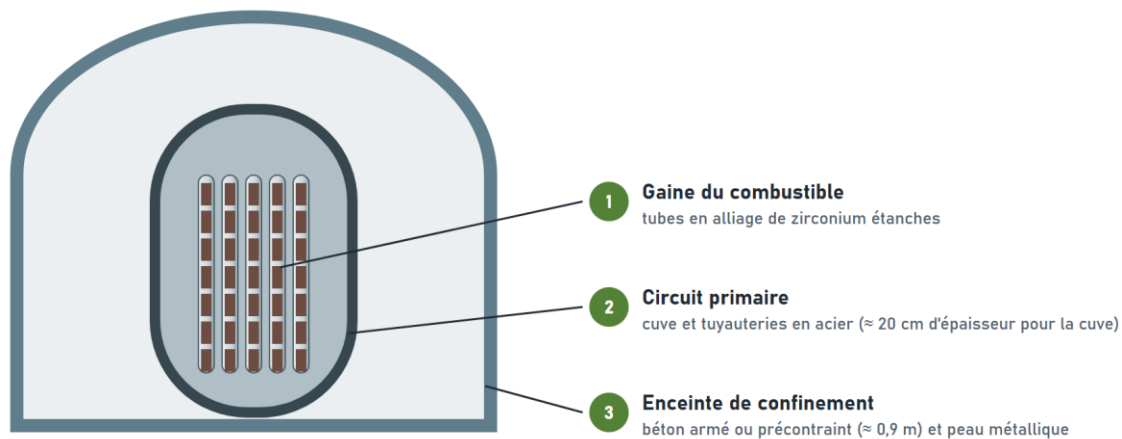


FIG. 5 Les trois barrières successives entre le combustible et l'environnement.

La sûreté nucléaire repose sur la **défense en profondeur** : des barrières physiques successives, des systèmes de sauvegarde redondants et une organisation contrôlée. En cas d'anomalie, les **barres de commande** tombent par gravité dans le cœur en moins de deux secondes et stoppent la réaction en chaîne (« arrêt automatique »).

LE SAVIEZ-VOUS ?

ICEDA et EPR2

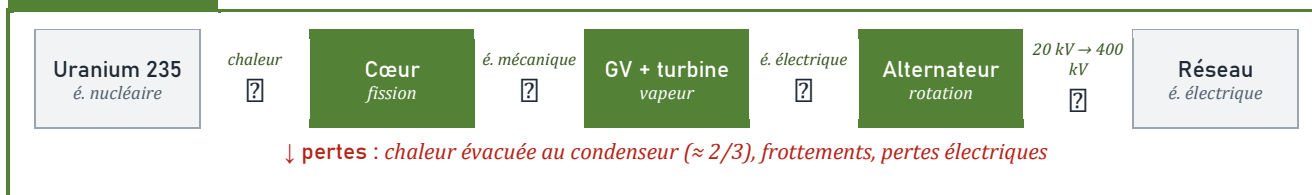
Le site accueille **ICEDA**, une installation qui conditionne et entrepose les déchets « activés » issus du démantèlement des réacteurs français. En 2023, le Bugey a été retenu par EDF pour accueillir une future **paire de réacteurs EPR2** (projet).

PARTIE II

Produire : de la fission à l'alternateur

À RETENIR

La chaîne de conversion d'une tranche



01 L'uranium : du minerai au combustible

L'uranium naturel contient deux **isotopes** principaux : l'**uranium 238** (99,3 %) et l'**uranium 235** (0,7 %). Seul l'uranium 235 se casse facilement avec des neutrons lents : on dit qu'il est **fissile**. Pour qu'un REP fonctionne, il faut **enrichir** l'uranium, c'est-à-dire augmenter la proportion d'uranium 235 de 0,7 % à environ **4 %**.

FORMULE

Composition d'un noyau

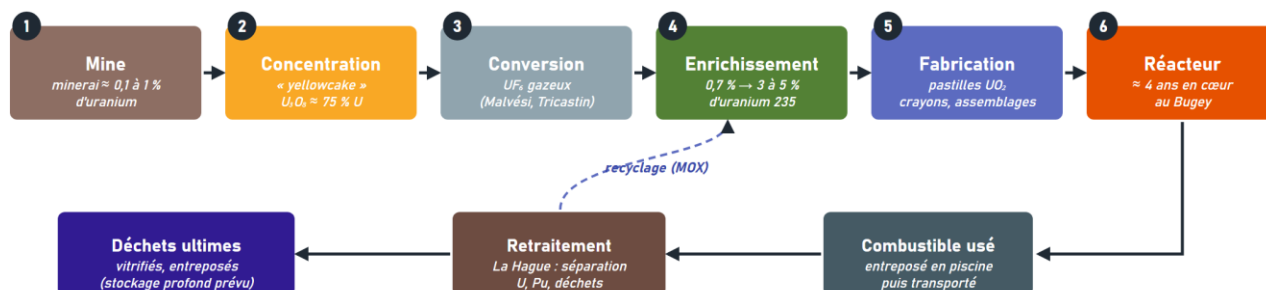
$${}^A_ZX : A = Z + N$$

A : nombre de masse (nucléons) · **Z** : numéro atomique (protons) · **N** : nombre de neutrons.

Uranium 235 : $Z = 92$, $N = 235 - 92 = 143$ · uranium 238 : $Z = 92$, $N = 146$.

Deux isotopes ont le même Z (même élément) mais des A différents.

AMONT DU CYCLE



AVAL DU CYCLE

Teneur en uranium 235 :



Le reste est de l'uranium 238, très peu fissile avec des neutrons lents.

FIG. 6 Le cycle du combustible : de la mine au réacteur, puis au retraitement.

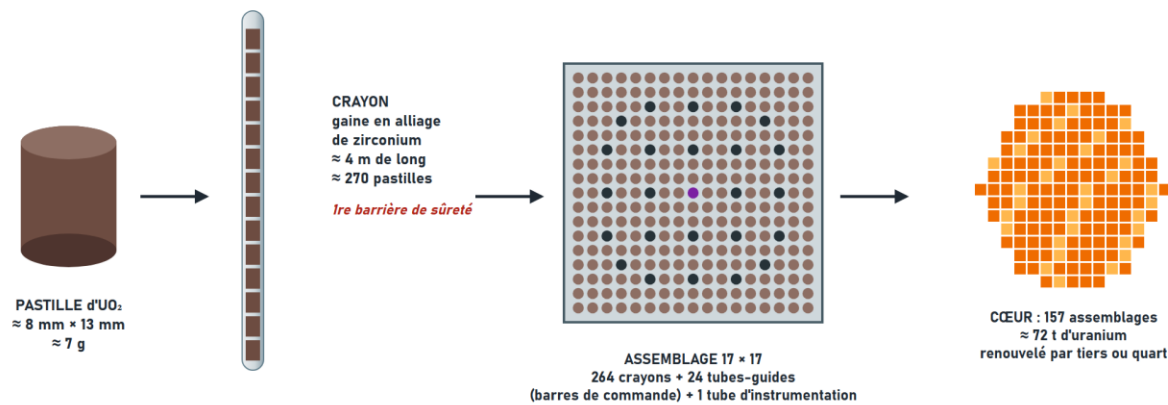


FIG. 7 De la pastille au cœur : pastille d'UO₂, crayon, assemblage 17 × 17 et cœur de 157 assemblages.

PIÈGE À ÉVITER

« Uranium trempé », « uranium enrichi », « uranium appauvri »

On ne « trempe » pas l'uranium : on l'**enrichit** en uranium 235 (≈ 4 % dans un REP). L'uranium **appauvri** est le résidu de l'enrichissement (≈ 0,2 à 0,3 % d'uranium 235). Bugey 1 utilisait de l'uranium **naturel** (0,7 %) : c'était possible grâce au graphite, meilleur modérateur que l'eau.

02 La fission et la réaction en chaîne

Lorsqu'un **neutron lent** frappe un noyau d'uranium 235, celui-ci devient un noyau d'uranium 236 très instable qui se **scinde en deux noyaux plus légers** (les produits de fission), en libérant **2 ou 3 neutrons** et une énergie considérable. Il existe des dizaines de couples de produits de fission possibles ; l'un des plus fréquents est le couple krypton-baryum :

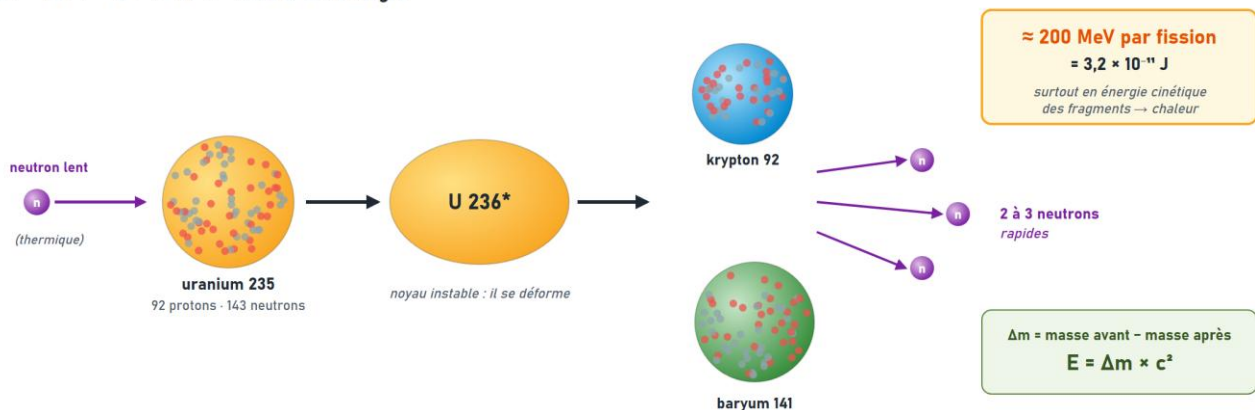
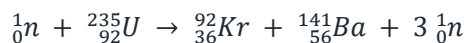


FIG. 8 Fission d'un noyau d'uranium 235 par un neutron lent.

MÉTHODE

Vérifier une équation nucléaire (lois de conservation)

- Conservation du nombre de masse A : $1 + 235 = 92 + 141 + 3 \times 1 = 236$ ✓
- Conservation du nombre de charge Z : $0 + 92 = 36 + 56 + 3 \times 0 = 92$ ✓
- Si une des deux sommes ne tombe pas juste, l'équation est **fausse** : il manque un neutron ou un noyau est mal identifié.

La masse des produits est **légèrement inférieure** à la masse des réactifs : c'est le **défaut de masse Δm** . D'après Einstein, cette masse « disparue » s'est transformée en énergie.

FORMULE**Énergie libérée : relation d'Einstein**

$$E = \Delta m \times c^2$$

$$1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J} ; 1 \text{ MeV} = 1,60 \times 10^{-13} \text{ J}$$

E : énergie libérée (J) · **Δm** = $m_{\text{avant}} - m_{\text{après}}$ (kg) · **c** = $3,00 \times 10^8$ m/s (vitesse de la lumière)

Unité de masse atomique : $1 \text{ u} = 1,66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$

On retiendra $\approx 200 \text{ MeV} \approx 3,2 \times 10^{-11} \text{ J}$ par fission, désintégrations des produits comprises.

EXEMPLE RÉSOLU**CALCUL 1 · Énergie libérée par une fission**

On considère la fission : $^1_0\text{n} + ^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{92}_{36}\text{Kr} + ^{141}_{56}\text{Ba} + 3 ^1_0\text{n}$. Masses : $m(\text{n}) = 1,00866 \text{ u}$; $m(\text{U}) = 235,04393 \text{ u}$; $m(\text{Kr}) = 91,92616 \text{ u}$; $m(\text{Ba}) = 140,91441 \text{ u}$. Calculer l'énergie libérée en joules puis en MeV.

a) Défaut de masse

Relation littérale $\Delta m = [m(\text{n}) + m(\text{U})] - [m(\text{Kr}) + m(\text{Ba}) + 3 m(\text{n})]$

Application numérique $\Delta m = (1,00866 + 235,04393) - (91,92616 + 140,91441 + 3 \times 1,00866) = 236,05259 - 235,86655$

Résultat $\Delta m = 0,18604 \text{ u} = 0,18604 \times 1,66054 \times 10^{-27} = 3,089 \times 10^{-28} \text{ kg}$

b) Énergie libérée

Relation littérale $E = \Delta m \times c^2$

Application numérique $E = 3,089 \times 10^{-28} \times (3,00 \times 10^8)^2 = 3,089 \times 10^{-28} \times 9,00 \times 10^{16}$

Résultat $E \approx 2,78 \times 10^{-11} \text{ J}$ soit $2,78 \times 10^{-11} / 1,60 \times 10^{-13} \approx 174 \text{ MeV}$

Interprétation Les désintégrations ultérieures des produits de fission ajoutent environ 25 MeV : on retient $\approx 200 \text{ MeV}$ par fission. C'est 50 millions de fois plus que la combustion d'une molécule de méthane ($\approx 8 \text{ eV}$).

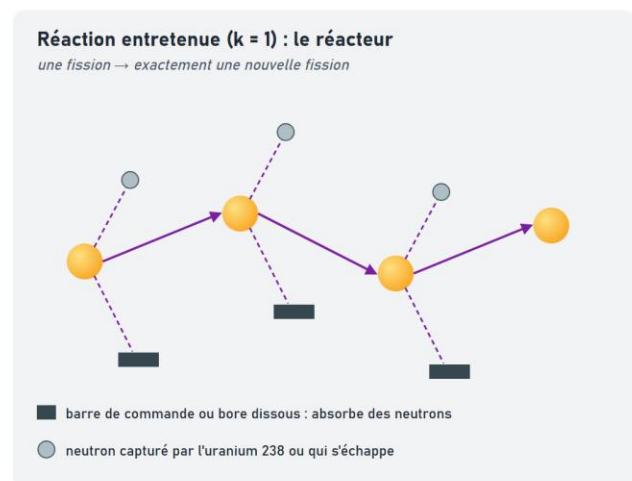
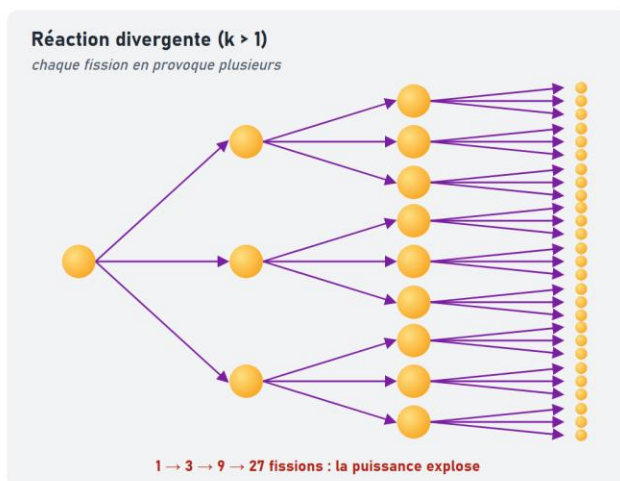
► **La réaction en chaîne et son pilotage**

FIG. 9 Réaction en chaîne divergente (bombe) et réaction entretenue (réacteur, $k = 1$).

Chaque fission libère 2 à 3 neutrons **rapides**. Pour qu'ils provoquent de nouvelles fissions, il faut les **ralentir** : c'est le rôle du **modérateur**, qui dans un REP est l'**eau du circuit primaire** elle-même. Le pilote règle le **facteur de multiplication k** (nombre moyen de nouvelles fissions provoquées par une fission) :

- $k < 1$: la réaction s'éteint (réacteur sous-critique, arrêt) ;
- $k = 1$: la réaction est entretenue, la puissance est constante (réacteur **critique**) ;

- $k > 1$: la puissance augmente ; dans un réacteur, on ne l'autorise que très légèrement et très brièvement, pour monter en puissance.

Deux moyens d'absorber des neutrons permettent de régler k : les **barres de commande** (alliage argent-indium-cadmium ou carbure de bore), qui descendent dans les tubes-guides des assemblages, et le **bore dissous** dans l'eau du circuit primaire.

À RETENIR

Les deux rôles de l'eau du circuit primaire

- **Caloporteur** : elle transporte la chaleur du cœur vers les générateurs de vapeur.
- **Modérateur** : elle ralentit les neutrons pour qu'ils puissent provoquer de nouvelles fissions.

► Combien d'uranium consomme un réacteur ?

FORMULE

Puissance, énergie et nombre de fissions

$$N = \frac{P \times t}{E_{\text{fission}}}$$

$$m = N \times m_{\text{noyau}} \text{ avec } m_{\text{noyau}} \approx A \times 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

N : nombre de fissions · P : puissance thermique (W) · t : durée (s) · $E_{\text{fission}} \approx 3,2 \times 10^{-11} \text{ J}$

m : masse d'uranium 235 consommée (kg)

EXEMPLE RÉSOLU

CALCUL 2 · Masse d'uranium 235 fissionnée par un réacteur du Bugey

Un réacteur du Bugey fonctionne à sa puissance thermique nominale $P_{\text{th}} = 2\,785 \text{ MW}$. Calculer le nombre de fissions par seconde, puis la masse d'uranium 235 fissionnée en un jour et en un an. Comparer avec le charbon ($\text{PCI} = 29 \text{ MJ/kg}$).

a) Nombre de fissions par seconde

Relation littérale $N = P_{\text{th}} \times t / E_{\text{fission}}$ avec $t = 1 \text{ s}$

Application numérique $N = 2\,785 \times 10^6 \times 1 / 3,2 \times 10^{-11}$

Résultat $N \approx 8,7 \times 10^{19}$ fissions par seconde

b) Masse fissionnée par jour

Relation littérale $m = N \times m_{\text{noyau}} \times t$ avec $m_{\text{noyau}} = 235 \times 1,66 \times 10^{-27} = 3,90 \times 10^{-25} \text{ kg}$

Application numérique $m = 8,70 \times 10^{19} \times 3,90 \times 10^{-25} \times 86\,400$

Résultat $m \approx 2,9 \text{ kg d'uranium 235 par jour, soit } \approx 1,07 \text{ t par an}$

c) Comparaison avec le charbon

Relation littérale $m_{\text{charbon}} = E / \text{PCI}$ avec $E = P_{\text{th}} \times t$ ($1 \text{ an} = 3,156 \times 10^7 \text{ s}$)

Application numérique $m_{\text{charbon}} = 2\,785 \times 10^6 \times 3,156 \times 10^7 / 29 \times 10^6$

Résultat $m_{\text{charbon}} \approx 3,0 \times 10^9 \text{ kg} = 3 \text{ millions de tonnes par an}$

Interprétation Environ une tonne d'uranium 235 fissionné remplace trois millions de tonnes de charbon, sans émission directe de CO_2 : c'est l'extraordinaire densité énergétique du nucléaire.

03 Les trois circuits d'un REP

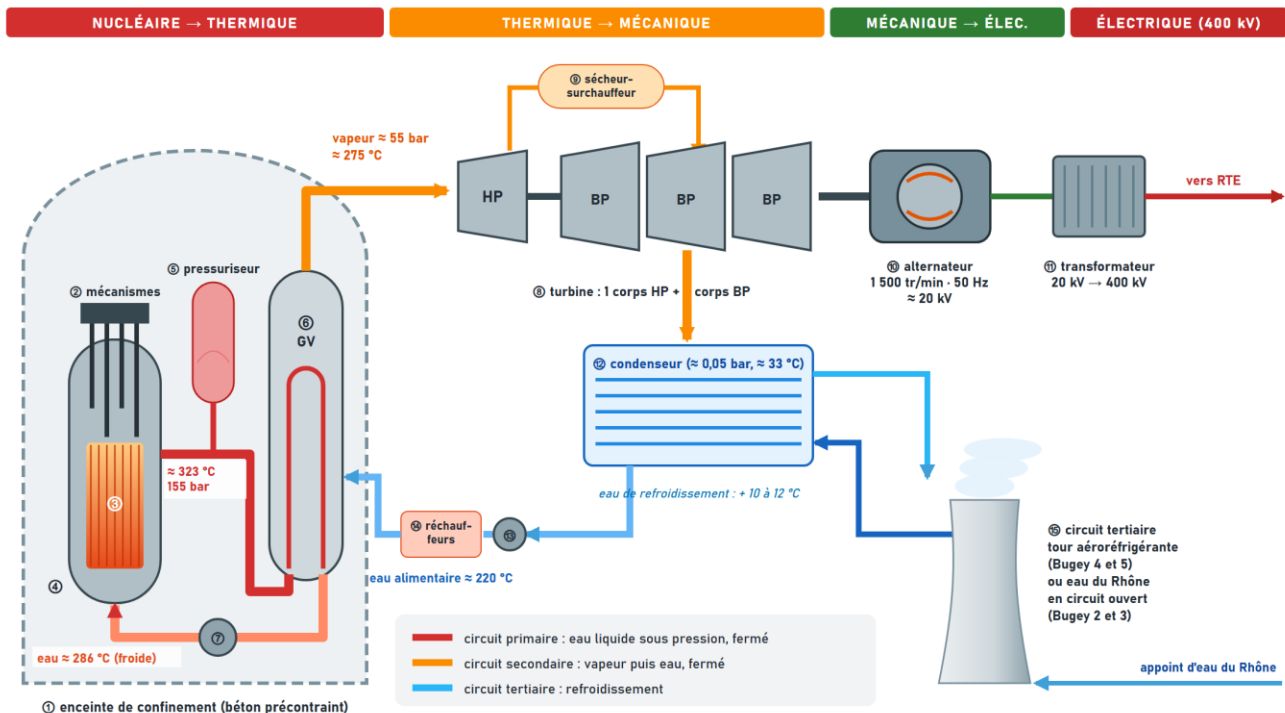


FIG. 10 Schéma de principe d'une tranche REP de 900 MW : circuits primaire, secondaire et tertiaire (repères ① à ⑮).

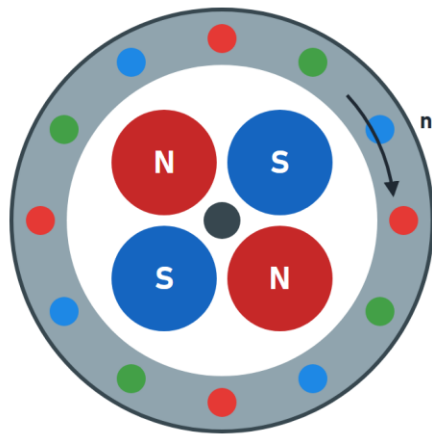
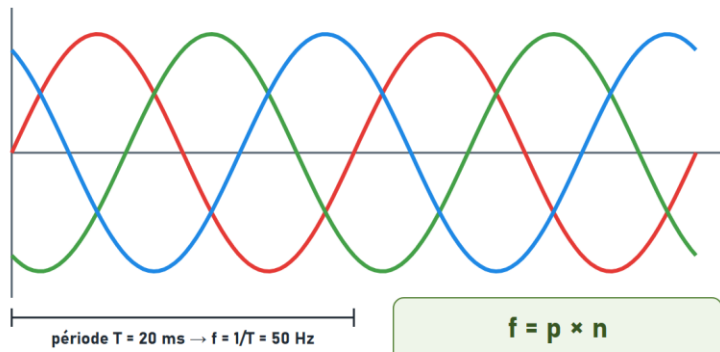
REPÈRE	ÉLÉMENT	RÔLE
①	Enceinte de confinement	bâtiment réacteur étanche en béton : 3e barrière de sûreté
② ③	Mécanismes et barres de commande, cœur	régler la réaction en chaîne ; le cœur produit la chaleur de fission
④	Cuve	réceptacle en acier qui contient le cœur, sous 155 bar
⑤	Pressuriseur	maintient la pression ($\approx 155\text{ bar}$) : l'eau reste liquide malgré $\approx 320^\circ\text{C}$
⑥	Générateur de vapeur (GV)	échangeur : l'eau primaire chaude vaporise l'eau secondaire sans contact
⑦	Pompe primaire	fait circuler l'eau du circuit primaire
⑧ ⑨	Turbine HP + BP, sécheur-surchauffeur	la vapeur se détend et fait tourner la turbine : énergie mécanique
⑩	Alternateur	convertit l'énergie mécanique en énergie électrique ($\approx 20\text{ kV}$, 50 Hz)
⑪	Transformateur principal	élève la tension de 20 kV à 400 kV pour le réseau RTE
⑫	Condenseur	retransforme la vapeur en eau grâce à l'eau froide du circuit tertiaire
⑬ ⑭	Pompe alimentaire, réchauffeurs	renvoient l'eau réchauffée ($\approx 220^\circ\text{C}$) vers les GV
⑮	Circuit tertiaire	évacue la chaleur : tours (B4, B5) ou Rhône en circuit ouvert (B2, B3)

PIÈGE À ÉVITER

Les circuits ne se mélangent pas

Les trois circuits sont **indépendants** : l'eau du circuit primaire, légèrement radioactive, ne sort jamais du bâtiment réacteur. Le GV et le condenseur sont des **échangeurs de chaleur** : la chaleur traverse des parois métalliques, pas l'eau. Le panache des tours est de la **vapeur d'eau** du circuit tertiaire : ni fumée, ni CO_2 , ni radioactivité.

► L'alternateur : produire du 50 Hz

rotor à 4 pôles ($p = 2$ paires) · stator : 3 bobinages3 tensions sinusoïdales décalées de 120° (triphasé)

$$f = p \times n$$

n en tr/s : $1\,500 \text{ tr/min} = 25 \text{ tr/s}$

$$f = 2 \times 25 = 50 \text{ Hz}$$

FIG. 11 Alternateur à 4 pôles : le rotor tourne à 1 500 tr/min et induit trois tensions décalées de 120° .

FORMULE

Fréquence d'un alternateur

$$f = p \times n$$

 f : fréquence (Hz) · p : nombre de paires de pôles · n : vitesse de rotation (tr/s)Au Bugey : $p = 2$ et $n = 1\,500 \text{ tr/min} = 25 \text{ tr/s}$, donc $f = 2 \times 25 = 50 \text{ Hz}$. Avec $p = 1$, il faudrait $3\,000 \text{ tr/min}$.

04 Rendement et refroidissement

FORMULE

Rendement et pertes

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} ; P_{\text{pertes}} = P_a - P_u$$

$$E = P \times t$$

 η : rendement (sans unité, $0 < \eta < 1$) · P_u : puissance utile (W) · P_a : puissance absorbée (W)E en kWh si P en kW et t en h · $1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$ · $1 \text{ TWh} = 10^9 \text{ kWh}$

EXEMPLE RÉSOLU

CALCUL 3 · Rendement et production annuelle d'une tranche

Une tranche du Bugey reçoit $P_{th} = 2\,785 \text{ MW}$ du cœur et fournit $P_e = 900 \text{ MW}$ au réseau. Elle fonctionne 75 % du temps à pleine puissance sur une année (8 760 h). Calculer le rendement, les pertes, l'énergie produite par la tranche puis par le site.

a) Rendement de la tranche

Relation littérale $\eta = P_e / P_{th}$ Application numérique $\eta = 900 / 2\,785$ Résultat $\eta \approx 0,323$ soit 32 %

b) Puissance perdue (évacuée par le circuit tertiaire)

Relation littérale $P_{\text{pertes}} = P_{th} - P_e$ Application numérique $P_{\text{pertes}} = 2\,785 - 900$ Résultat $P_{\text{pertes}} = 1\,885 \text{ MW}$

c) Énergie électrique annuelle

Relation littérale $E = P_e \times t$ avec $t = 0,75 \times 8\,760 = 6\,570 \text{ h}$ Application numérique $E = 900 \times 6\,570 = 5\,913\,000 \text{ MWh}$

Résultat $E \approx 5,9 \text{ TWh}$ par tranche, soit $\approx 23,7 \text{ TWh}$ pour les 4 tranches

Interprétation Deux tiers de l'énergie du cœur partent en chaleur : c'est la limite imposée par la thermodynamique à une machine qui fonctionne avec de la vapeur à $\approx 275 \text{ }^\circ\text{C}$.

Bilan de puissance d'une tranche de 900 MW du Bugey (ordres de grandeur)



FIG. 12 Bilan de puissance d'une tranche : la largeur des flèches est proportionnelle à la puissance.

FORMULE

Échauffement de l'eau de refroidissement

$$Q = m \times c \times \Delta T \Rightarrow P = q_m \times c \times \Delta T \text{ avec } q_m = \rho \times q_v$$

P : puissance thermique évacuée (W) · q_m : débit massique (kg/s) · q_v : débit volumique (m^3/s)

$\rho = 1\,000 \text{ kg/m}^3$ · $c = 4\,180 \text{ J/(kg}\cdot^\circ\text{C)}$ pour l'eau · ΔT : élévation de température ($^\circ\text{C}$)

EXEMPLE RÉSOLU

CALCUL 4 · L'eau du Rhône se réchauffe-t-elle beaucoup ?

Bugey 2 et Bugey 3 sont refroidis en circuit ouvert. Chacune rejette 1 885 MW de chaleur. Chaque condenseur est traversé par $q_v = 40 \text{ m}^3/\text{s}$ d'eau du Rhône. Le débit du fleuve est d'environ $450 \text{ m}^3/\text{s}$.

a) Échauffement de l'eau dans un condenseur

Relation littérale $\Delta T = P / (\rho \times q_v \times c)$

Application numérique $\Delta T = 1\,885 \times 10^6 / (1\,000 \times 40 \times 4\,180)$

Résultat $\Delta T \approx 11,3 \text{ }^\circ\text{C}$

b) Échauffement moyen du Rhône après mélange (2 tranches)

Relation littérale $\Delta T_{\text{Rhône}} = 2 P / (\rho \times q_{v \text{ Rhône}} \times c)$

Application numérique $\Delta T_{\text{Rhône}} = 2 \times 1\,885 \times 10^6 / (1\,000 \times 450 \times 4\,180)$

Résultat $\Delta T_{\text{Rhône}} \approx 2,0 \text{ }^\circ\text{C}$

Interprétation L'échauffement du fleuve est limité par la réglementation. Lors des canicules, quand le Rhône est chaud et bas, EDF peut devoir réduire la puissance des tranches en circuit ouvert pour protéger la faune aquatique.

ORDRES DE GRANDEUR

À connaître pour vérifier un résultat

GRANDEUR	VALEUR
Énergie d'une fission	$\approx 200 \text{ MeV} \approx 3,2 \times 10^{-11} \text{ J}$
Uranium 235 fissionné par un réacteur de 900 MW	$\approx 3 \text{ kg par jour}$
Rendement d'une tranche REP	$\approx 33 \%$
Pression / température du circuit primaire	$155 \text{ bar} / \approx 290 \text{ à } 325 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Vitesse d'un alternateur à 4 pôles	$1\,500 \text{ tr/min pour } 50 \text{ Hz}$

PARTIE III

Transporter : le réseau RTE en très haute tension

À la sortie du transformateur principal, l'électricité du Bugey est injectée sur le réseau de **RTE** (Réseau de transport d'électricité), qui exploite plus de 100 000 km de lignes en France. Le réseau est **maillé** : chaque poste est relié à plusieurs autres, si bien que l'électricité du Bugey alimente toute la région et que, en cas de panne d'une ligne, d'autres chemins existent.

DOMAINE	TENSIONS USUELLES (ALTERNATIF)	RÔLE	EXPLOITANT
HTB	400 kV · 225 kV · 90 et 63 kV	transport national, interconnexions, répartition régionale	RTE
HTA	20 kV (de 1 kV à 50 kV)	distribution dans les communes et zones d'activités	Enedis
BT	400 V / 230 V (de 50 V à 1 000 V)	alimentation des logements, commerces, écoles	Enedis

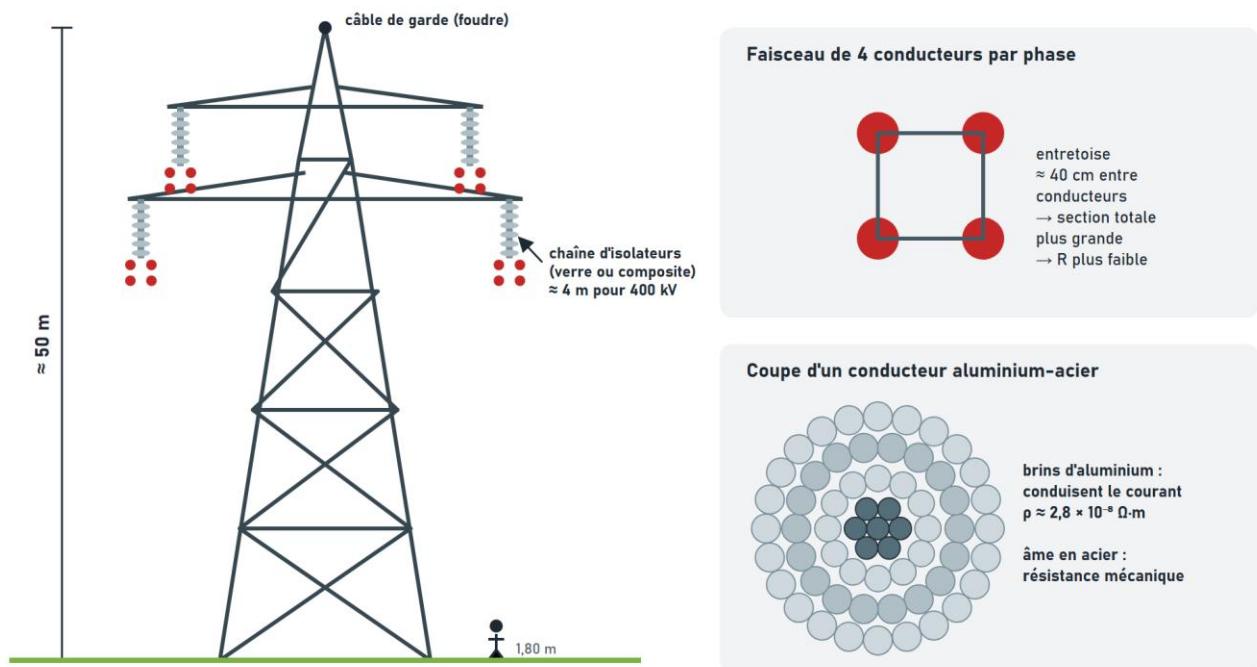


FIG. 13 Pylône 400 kV : faisceau de quatre conducteurs par phase et coupe d'un conducteur aluminium-acier.

01 La puissance en triphasé

Le réseau transporte l'énergie avec **trois phases**. La puissance active transportée s'exprime à partir de la **tension composée U** (entre deux phases) et de l'intensité **I** dans chaque conducteur.

FORMULE

Puissances en triphasé

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi ; S = \sqrt{3} \times U \times I$$

P : puissance active (W) · **S** : puissance apparente (VA) · **U** : tension entre phases (V) · **I** : intensité en ligne (A)

cos φ : facteur de puissance (sans unité, proche de 1 sur le réseau de transport)

EXEMPLE RÉSOLU

CALCUL 5 · Intensité dans une ligne 400 kV

Une tranche du Bugey injecte $P = 900 \text{ MW}$ sous $U = 400 \text{ kV}$ avec $\cos \varphi = 0,95$. Calculer l'intensité dans chaque phase, puis dans chacun des 4 conducteurs du faisceau.

Relation littérale $I = P / (\sqrt{3} \times U \times \cos \varphi)$

Application numérique $I = 900 \times 10^6 / (1,732 \times 400 \times 10^3 \times 0,95)$

Résultat $I \approx 1\,367 \text{ A par phase}$

Relation littérale $I_{\text{conducteur}} = I / 4$

Application numérique $I_{\text{conducteur}} = 1\,367 / 4$

Résultat $I_{\text{conducteur}} \approx 342 \text{ A}$

Interprétation Le faisceau répartit le courant et limite l'échauffement de chaque conducteur.

02 La résistance d'une ligne

FORMULE

Résistance d'un conducteur

$$R = \frac{\rho \times L}{S}$$

R : résistance (Ω) · ρ : résistivité ($\Omega \cdot \text{m}$), aluminium $\approx 2,8 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ · L : longueur (m) · S : section (m^2)

Attention aux unités : $1 \text{ mm}^2 = 10^{-6} \text{ m}^2$; $1 \text{ km} = 10^3 \text{ m}$.

EXEMPLE RÉSOLU

CALCUL 6 · Résistance d'une ligne de 49 km

On étudie une ligne 400 kV de $L = 49 \text{ km}$ (valeur d'exemple). Chaque phase est un faisceau de 4 conducteurs de 570 mm^2 d'aluminium. Calculer la résistance d'une phase.

a) Section totale d'une phase

Relation littérale $S = 4 \times 570 \text{ mm}^2$

Application numérique $S = 2\,280 \text{ mm}^2 = 2\,280 \times 10^{-6} \text{ m}^2$

Résultat $S = 2,28 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

b) Résistance d'une phase

Relation littérale $R = \rho \times L / S$

Application numérique $R = 2,8 \times 10^{-8} \times 49 \times 10^3 / 2,28 \times 10^{-3}$

Résultat $R \approx 0,60 \Omega$

Interprétation C'est très faible, mais traversé par plus de 1 000 A, ce fil chauffe : c'est l'effet Joule.

03 Les pertes par effet Joule

FORMULE

Pertes Joule d'une ligne triphasée

$$P_J = 3 \times R \times I^2$$

$$P_J = \frac{R \times P^2}{U^2 \times \cos^2 \varphi}$$

P_J : pertes (W) · R : résistance d'une phase (Ω) · I : intensité en ligne (A) · le facteur 3 compte les trois phases

À puissance transportée P constante, les pertes sont inversement proportionnelles au carré de la tension.

EXEMPLE RÉSOLU

CALCUL 7 · Pertes de la ligne en 400 kV

Avec les résultats des calculs 5 et 6 ($I = 1\,367\text{ A}$; $R = 0,60\ \Omega$), calculer les pertes Joule de la ligne et leur part dans la puissance transportée.

Relation littérale $P_J = 3 \times R \times I^2$

Application numérique $P_J = 3 \times 0,60 \times 1\,367^2$

Résultat $P_J \approx 3,4 \times 10^6\text{ W} = 3,4\text{ MW}$

Relation littérale $\text{part} = P_J / P$

Application numérique $\text{part} = 3,4 / 900$

Résultat $\text{part} \approx 0,0037\text{ soit }0,37\%$

Interprétation Sur 49 km, moins de 0,4 % de la puissance est perdue : le transport en 400 kV est très efficace.

04 Pourquoi 400 kV et pas 20 kV ?

Pertes Joule pour transporter 900 MW sur une même ligne ($R = 0,6\ \Omega$ par phase, $\cos \phi = 0,95$)

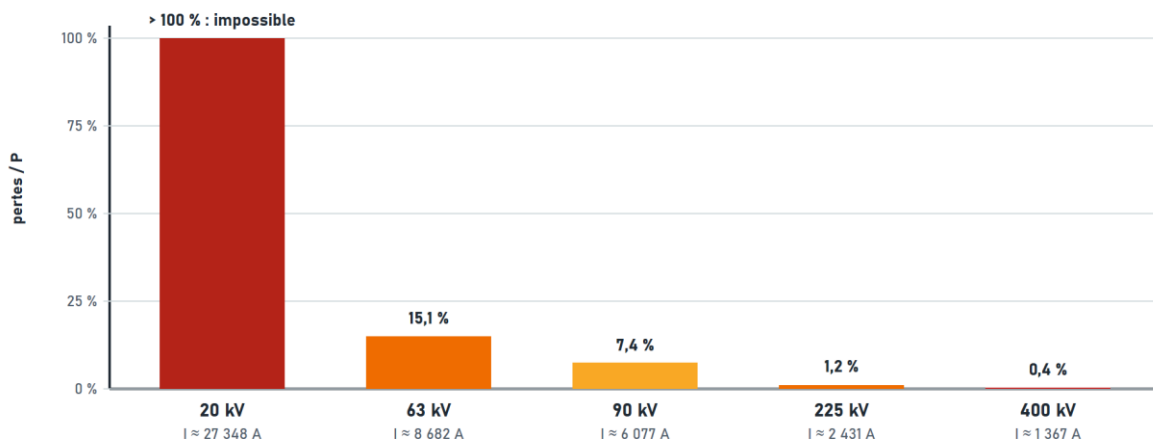


FIG. 14 Pertes Joule pour transporter 900 MW sur la même ligne selon la tension choisie.

EXEMPLE RÉSOLU

CALCUL 8 · Et si l'on transportait directement en 20 kV ?

L'alternateur fournit environ 20 kV. Reprendre le calcul sur la même ligne ($R = 0,60\ \Omega$) en transportant les 900 MW sous 20 kV ($\cos \phi = 0,95$).

a) Intensité

Relation littérale $I = P / (\sqrt{3} \times U \times \cos \phi)$

Application numérique $I = 900 \times 10^6 / (1,732 \times 20 \times 10^3 \times 0,95)$

Résultat $I \approx 27\,350\text{ A}$

b) Pertes

Relation littérale $P_J = 3 \times R \times I^2$

Application numérique $P_J = 3 \times 0,60 \times 27\,350^2$

Résultat $P_J \approx 1,35 \times 10^9\text{ W} = 1\,350\text{ MW}$

c) Conclusion

Relation littérale $\text{rapport} = (400 / 20)^2$

Application numérique $\text{rapport} = 20^2 = 400$

Résultat **les pertes seraient 400 fois plus grandes : supérieures à la puissance produite !**

Interprétation Transporter en 20 kV est physiquement impossible. Le transformateur élévateur multiplie la tension par 20 et divise l'intensité par 20, donc les pertes par 400.

PIÈGE À ÉVITER

« Si U augmente, la puissance augmente »

Non : la puissance P est imposée par les **consommateurs**. Si l'on augmente U, c'est l'**intensité I** qui diminue ($I = P / (\sqrt{3} U \cos \varphi)$). Et comme les pertes dépendent de I^2 , doubler la tension divise les pertes par **quatre**.

PARTIE IV

Le poste source : du transport à la distribution

Le 400 kV ne peut pas entrer dans une ville. L'énergie passe d'abord par un **poste d'interconnexion** (400 kV → 225 kV), puis par des lignes 225 kV ou 63 kV jusqu'à un **poste source** HTB/HTA. Il en existe environ 2 200 en France : c'est la **frontière** entre le réseau de transport de **RTE** et le réseau de distribution d'**Enedis**. De lui partent les **départs HTA à 20 kV** qui irriguent Pont-de-Chéruy, Tignieu-Jamezieu, Charvieu-Chavagneux et les zones d'activités.

01 Le transformateur

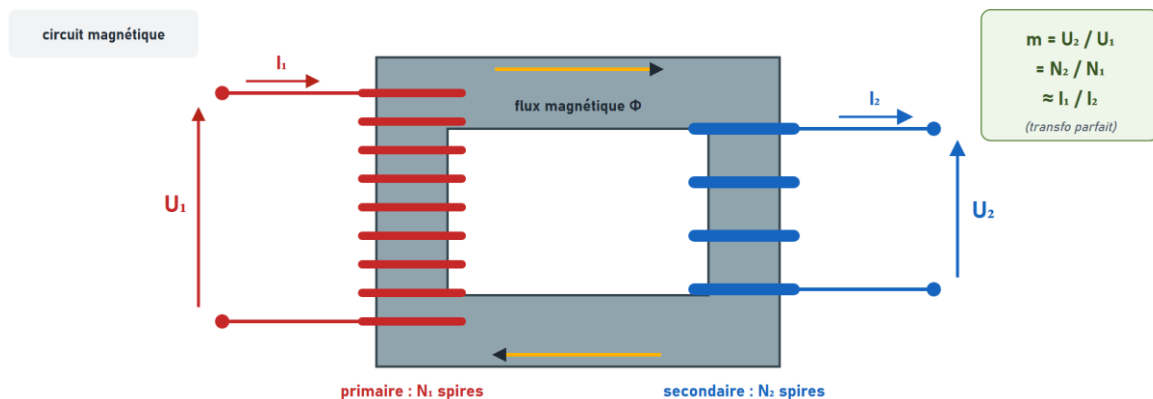


FIG. 15 Principe du transformateur : deux bobinages enroulés sur un même circuit magnétique.

Un transformateur ne fonctionne qu'en **alternatif** : le courant variable du primaire crée un **flux magnétique variable** dans le circuit magnétique, qui induit une tension dans le secondaire. Il n'a **aucune pièce mobile** et son rendement dépasse 99 %.

FORMULE

Rapport de transformation (transformateur parfait)

$$m = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

m : rapport de transformation (sans unité) · **U** : tensions (V) · **N** : nombres de spires · **I** : intensités (A)

$m > 1$: transformateur **élevateur** (Bugey, 20 → 400 kV) · $m < 1$: transformateur **abaisseur** (poste source, 225 → 20 kV)

EXEMPLE RÉSOLU

CALCUL 9 · Le transformateur du poste source

Un transformateur triphasé de poste source abaisse $U_1 = 225$ kV en $U_2 = 20$ kV. Sa puissance apparente nominale est $S_n = 36$ MVA et son primaire compte $N_1 = 1\,800$ spires. Calculer m , N_2 et les intensités nominales primaire et secondaire.

a) Rapport de transformation et spires

Relation littérale $m = U_2 / U_1$; $N_2 = m \times N_1$

Application numérique $m = 20 / 225 = 0,0889$; $N_2 = 0,0889 \times 1\,800$

Résultat **$m \approx 0,089$ et $N_2 = 160$ spires**

b) Intensités nominales

Relation littérale $I = S_n / (\sqrt{3} \times U)$

Application numérique $I_1 = 36 \times 10^6 / (1,732 \times 225 \times 10^3)$; $I_2 = 36 \times 10^6 / (1,732 \times 20 \times 10^3)$

Résultat **$I_1 \approx 92$ A et $I_2 \approx 1\,039$ A**

Interprétation Vérification : $I_1 / I_2 = 92,4 / 1\,039 = 0,089 = m$. Côté 20 kV, le courant est 11 fois plus fort : les câbles HTA sont plus gros que ce que la tension laisse imaginer.

FORMULE

Rendement d'un transformateur

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{fer} + P_{cuivre}}$$

$$P_{cuivre} = P_{cc} \times (S / S_n)^2$$

P_2 : puissance active fournie (W) · P_{fer} : pertes à vide, constantes · P_{cuivre} : pertes Joule dans les bobinages

P_{cc} : pertes cuivre à la charge nominale S_n ; elles varient comme le **carré** de la charge

EXEMPLE RÉSOLU

CALCUL 10 · Rendement du transformateur à pleine charge

Le transformateur de 36 MVA fournit sa puissance nominale avec $\cos \varphi = 0,90$. Ses pertes à vide valent $P_{fer} = 22$ kW et ses pertes cuivre nominales $P_{cc} = 165$ kW.

a) Puissance active fournie

Relation littérale $P_2 = S_n \times \cos \varphi$

Application numérique $P_2 = 36 \times 0,90$

Résultat $P_2 = 32,4$ MW

b) Rendement

Relation littérale $\eta = P_2 / (P_2 + P_{fer} + P_{cc})$

Application numérique $\eta = 32,4 / (32,4 + 0,022 + 0,165)$

Résultat $\eta \approx 0,994$ soit 99,4 %

Interprétation 187 kW de pertes suffisent pourtant à chauffer l'huile : le transformateur est refroidi par des radiateurs et des ventilateurs.

02 Le poste source et l'alimentation de Pont-de-Chéruy

Schéma unifilaire simplifié d'un poste source HTB / HTA

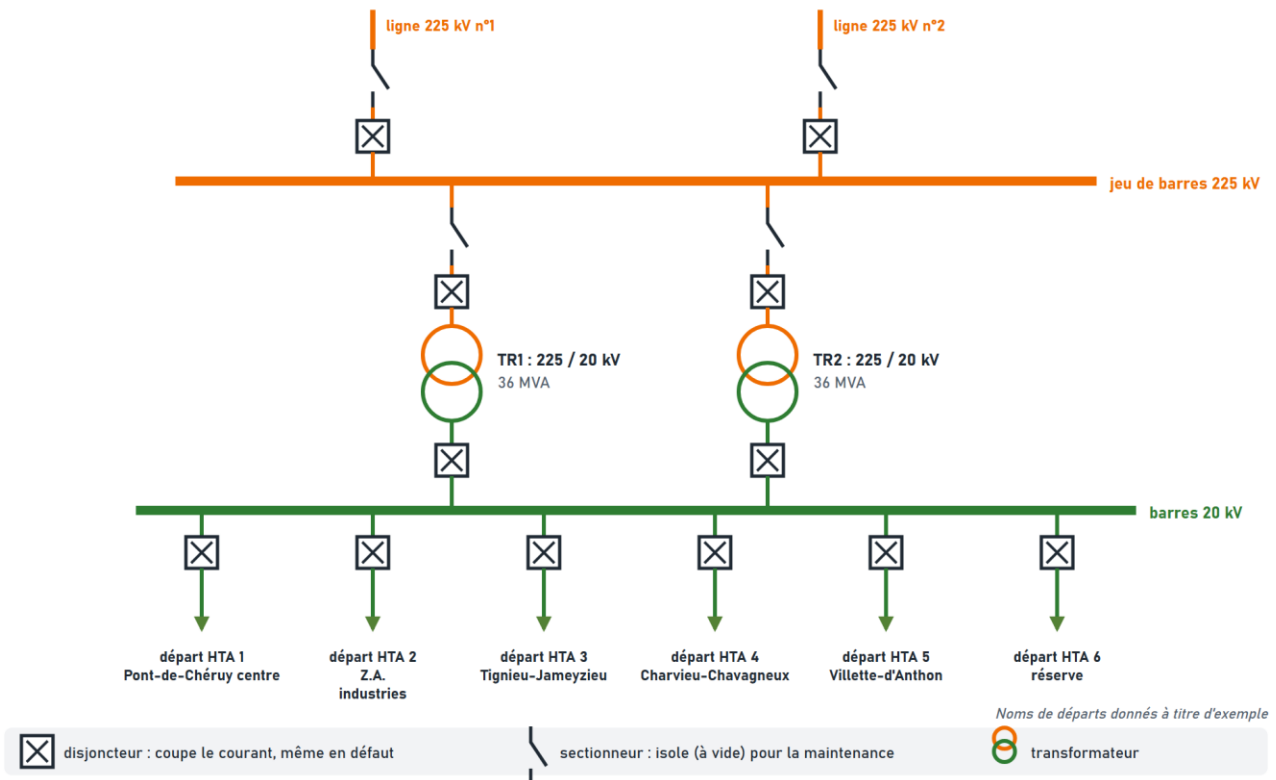


FIG. 16 Schéma unifilaire simplifié d'un poste source : arrivées 225 kV, transformateurs, départs HTA 20 kV.

APPAREIL	FONCTION
Disjoncteur	établit et coupe le courant, y compris un courant de court-circuit (protection)
Sectionneur	isole visiblement une partie de l'installation, uniquement à vide, pour la maintenance
Jeu de barres	nœud électrique qui relie les arrivées et les départs
Transformateur HTB/HTA	abaisse la tension 225 kV → 20 kV
Parafoudre	protège le matériel contre les surtensions (foudre)
Protections et télécommande	détectent les défauts et permettent la conduite à distance

EXEMPLE RÉSOLU

CALCUL 11 · Combien de logements peut alimenter un départ HTA ?

Un départ HTA 20 kV vers le centre de Pont-de-Chéruy peut transporter au maximum $I = 400$ A avec $\cos \varphi = 0,93$. On estime qu'à la pointe d'un soir d'hiver, un logement appelle en moyenne $p = 3$ kW (tous les logements ne consomment pas au maximum en même temps).

a) Puissance maximale du départ

Relation littérale $P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi$

Application numérique $P = 1,732 \times 20 \times 10^3 \times 400 \times 0,93$

Résultat $P \approx 12,9$ MW

b) Nombre de logements

Relation littérale $n = P / p$

Application numérique $n = 12,9 \times 10^6 / 3\,000$

Résultat $n \approx 4\,300$ logements

Interprétation Un seul départ HTA suffit à peu près pour une ville de la taille de Pont-de-Chéruy ; un poste source compte en général une dizaine de départs.

EXEMPLE RÉSOLU

CALCUL 12 · Combien de villes comme Pont-de-Chéruy le Bugey alimente-t-il ?

Sur une année, la puissance moyenne appelée par la commune (logements, commerces, écoles, petites industries) est estimée à $P_{\text{moy}} = 5,5 \text{ MW}$. Le site du Bugey produit environ 23,7 TWh par an (calcul 3).

a) Énergie annuelle consommée par la commune

Relation littérale $E = P_{\text{moy}} \times t$

Application numérique $E = 5,5 \times 8\,760 = 48\,180 \text{ MWh}$

Résultat $E \approx 48 \text{ GWh}$

b) Nombre de communes équivalentes

Relation littérale $n = E_{\text{Bugey}} / E_{\text{commune}}$

Application numérique $n = 23,7 \times 10^3 \text{ GWh} / 48,2 \text{ GWh}$

Résultat $n \approx 490 \text{ communes}$

Interprétation Le Bugey produit à lui seul de quoi alimenter près de 500 villes comme Pont-de-Chéruy : la production nucléaire est très centralisée.

PARTIE V

Arriver au domicile

01 Le réseau basse tension

Du poste source jusqu'aux habitations

Le réseau HTA (20 kV) irrigue la commune ; le poste HTA/BT abaisse la tension pour un quartier (quelques centaines de logements).

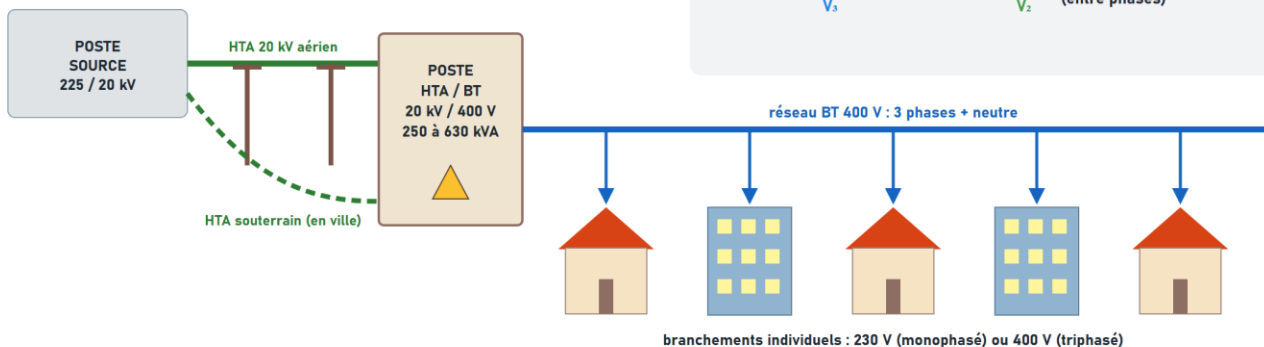


FIG. 17 Du poste source aux habitations : réseau HTA, poste HTA/BT et réseau BT triphasé + neutre.

Dans chaque quartier, un **poste HTA/BT** (cabine maçonnée, poste au sol ou transformateur sur poteau) abaisse la tension de 20 kV à **400 V entre phases**. Le réseau BT comporte **trois phases et un neutre** : entre une phase et le neutre, la tension vaut **230 V** ; entre deux phases, **400 V**.

FORMULE Tensions simples et composées

$$U = \sqrt{3} \times V ; 400 \approx 1,732 \times 230$$

V : tension simple, entre phase et neutre (V) · U : tension composée, entre deux phases (V)

02 Le branchement et le tableau électrique

Du réseau public au tableau électrique du logement

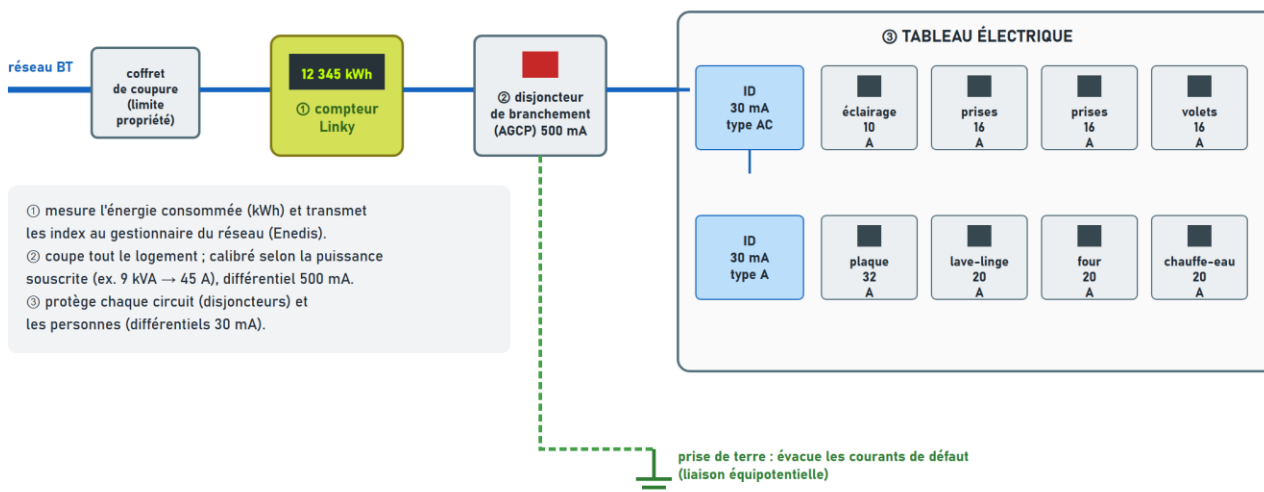


FIG. 18 Branchement d'un logement : coffret, compteur Linky, disjoncteur de branchement, tableau, prise de terre.

PUISSANCE SOUSCRITE	6 KVA	9 KVA	12 KVA
Calibre du disjoncteur de branchement (monophasé 230 V)	30 A	45 A	60 A

FORMULE

Puissance en monophasé

$$P = U \times I \times \cos \varphi ; S = U \times I$$

$$U = 230 \text{ V} \cdot I : \text{intensité (A)} \cdot \text{pour les appareils de chauffage (résistifs), } \cos \varphi = 1$$

EXEMPLE RÉSOLU

CALCUL 13 · Le disjoncteur va-t-il couper ?

Un logement de Pont-de-Chérury a souscrit 9 kVA. Un soir, fonctionnent en même temps : une plaque de cuisson de 7,0 kW, un four de 3,6 kW et un chauffe-eau de 2,4 kW ($\cos \varphi = 1$).

a) Intensité maximale autorisée

Relation littérale $I_{\max} = S / U$

Application numérique $I_{\max} = 9\,000 / 230$

Résultat $I_{\max} \approx 39 \text{ A}$ (disjoncteur réglé à 45 A)

b) Intensité appelée

Relation littérale $I = (P_1 + P_2 + P_3) / U$

Application numérique $I = (7\,000 + 3\,600 + 2\,400) / 230 = 13\,000 / 230$

Résultat $I \approx 57 \text{ A}$

Interprétation $57 \text{ A} > 45 \text{ A}$: le disjoncteur de branchement coupe. Il faut décaler le chauffe-eau en heures creuses ou souscrire 12 kVA.

EXEMPLE RÉSOLU

CALCUL 14 · Énergie et coût d'un chauffe-eau

Le chauffe-eau électrique de 2 400 W fonctionne en moyenne 3 h par jour toute l'année. On prend un prix de 0,20 €/kWh (valeur d'exemple).

Relation littérale $E = P \times t$

Application numérique $E = 2,4 \text{ kW} \times 3 \text{ h} \times 365$

Résultat $E \approx 2\,628 \text{ kWh par an}$

Relation littérale $\text{Coût} = E \times \text{prix}$

Application numérique $\text{Coût} = 2\,628 \times 0,20$

Résultat $\text{Coût} \approx 526 \text{ € par an}$

Interprétation Le chauffe-eau représente souvent le premier poste de consommation après le chauffage ; le Linky permet de le piloter en heures creuses.

PIÈGE À ÉVITER

Linky, disjoncteur, différentiel : qui fait quoi ?

- Le **compteur Linky** mesure l'énergie (kWh) : il ne protège rien et ne « produit » aucune économie à lui seul.
- Le **disjoncteur de branchement** limite la puissance au contrat souscrit et coupe tout le logement.
- Les **interrupteurs différentiels 30 mA** protègent les **personnes** contre l'électrocution ; les **disjoncteurs divisionnaires** protègent les **câbles** contre les surintensités.

03 Le bilan : de la fission à la prise

De la chaleur de fission à la prise : la chaîne des rendements (ordres de grandeur)

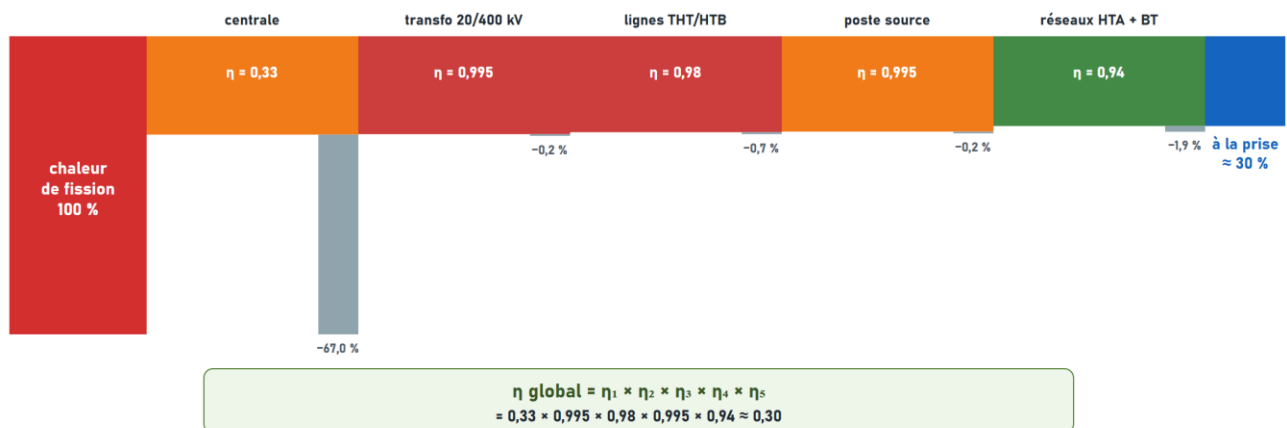


FIG. 19 La chaîne des rendements, de la chaleur de fission jusqu'à la prise du logement.

FORMULE

Rendement global d'une chaîne

$$\eta_{global} = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times \dots \times \eta_n$$

Les rendements de chaque étage se **multiplient** (ils ne s'additionnent jamais).

EXEMPLE RÉSOLU

CALCUL 15 · Rendement global du Bugey jusqu'à la prise

Rendements : centrale 0,33 ; transformateur élévateur 0,995 ; lignes THT et HTB 0,98 ; poste source 0,995 ; réseaux HTA et BT 0,94. Calculer le rendement global puis l'énergie thermique à libérer dans le cœur pour disposer de 1 kWh à la prise.

Relation littérale $\eta_g = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times \eta_4 \times \eta_5$

Application numérique $\eta_g = 0,33 \times 0,995 \times 0,98 \times 0,995 \times 0,94$

Résultat $\eta_g \approx 0,30$ soit 30 %

Relation littérale $E_{th} = E_{prise} / \eta_g$

Application numérique $E_{th} = 1 / 0,30$

Résultat $E_{th} \approx 3,3$ kWh de chaleur pour 1 kWh à la prise

Interprétation Sur 10 kWh libérés par la fission, environ 3 arrivent à la prise ; l'essentiel des pertes est dans la centrale, pas dans le réseau.

EXEMPLE RÉSOLU

CALCUL 16 · Combien d'uranium pour un foyer de Pont-de-Chérucy ?

Un foyer consomme 4 500 kWh d'électricité par an. Avec $\eta_g = 0,30$ et $E_{fission} = 3,2 \times 10^{-11}$ J, calculer la masse d'uranium 235 fissionnée au Bugey pour ce foyer, puis la masse de charbon équivalente (PCI = 29 MJ/kg).

a) Énergie thermique nécessaire

Relation littérale $E_{th} = E / \eta_g$

Application numérique $E_{th} = 4\,500 / 0,30 = 15\,000$ kWh = $15\,000 \times 3,6 \times 10^6$

Résultat $E_{th} = 5,4 \times 10^{10}$ J

b) Nombre de fissions et masse d'uranium 235

Relation littérale $N = E_{th} / E_{fission}$; $m = N \times m_{noyau}$

Application numérique $N = 5,4 \times 10^{10} / 3,2 \times 10^{-11} = 1,69 \times 10^{21}$; $m = 1,69 \times 10^{21} \times 3,90 \times 10^{-25}$

Résultat $m \approx 6,6 \times 10^{-4}$ kg = 0,66 g

c) Masse de charbon équivalente

Relation littérale $m_{\text{charbon}} = E_{\text{th}} / \text{PCI}$

Application numérique $m_{\text{charbon}} = 5,4 \times 10^{10} / 29 \times 10^6$

Résultat $m_{\text{charbon}} \approx 1\,860 \text{ kg} \approx 1,9 \text{ t}$

Interprétation Moins d'un gramme d'uranium 235 par an et par foyer, contre près de deux tonnes de charbon : voilà la réponse à la question du chapitre.

PARTIE VI

Formulaire et méthode

THÈME	RELATION	UNITÉS
Noyau	$A = Z + N$	A, Z, N sans unité
Énergie de masse	$E = \Delta m \times c^2$	J ; kg ; $c = 3,00 \times 10^8$ m/s
Fissions	$N = P \times t / E_{\text{fission}} ; m = N \times A \times 1,66 \times 10^{-27}$	W ; s ; J ; kg
Énergie, puissance	$E = P \times t$	J = W × s ; kWh = kW × h
Rendement	$\eta = P_u / P_a ; \eta_{\text{global}} = \eta_1 \times \eta_2 \times \dots$	sans unité
Échauffement	$P = \rho \times q_v \times c \times \Delta T$	W ; kg/m ³ ; m ³ /s ; J/(kg·°C) ; °C
Alternateur	$f = p \times n$	Hz ; tr/s
Triphasé	$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi ; S = \sqrt{3} \times U \times I$	W ; VA ; V ; A
Résistance	$R = \rho \times L / S$	Ω ; $\Omega \cdot m$; m ; m ²
Pertes Joule	$P_J = 3 \times R \times I^2$	W ; Ω ; A
Transformateur	$m = U_2 / U_1 = N_2 / N_1 = I_1 / I_2$	sans unité
Pertes cuivre	$P_{\text{cuivre}} = P_{cc} \times (S / S_n)^2$	W
Monophasé	$P = U \times I \times \cos \varphi ; U = \sqrt{3} \times V$	W ; V ; A
Combustion	$E = m \times PCI$	J ; kg ; J/kg

MÉTHODE

Rédiger un calcul (attendu au bac)

- **Relation littérale** : la formule avec des lettres, avant tout nombre ($I = P / (\sqrt{3} \times U \times \cos \varphi)$).
- **Application numérique** : on remplace chaque lettre par sa valeur **dans les unités du Système international** (W, V, m, s, kg).
- **Résultat** : valeur avec un nombre raisonnable de chiffres significatifs (2 ou 3) et **son unité**.
- **Vérifier l'ordre de grandeur** : un rendement est inférieur à 1, des pertes sont inférieures à la puissance transportée.
- **Conclure** en une phrase qui répond à la question posée.

SYNTHÈSE

Ce qu'il faut retenir du chapitre

Au **Bugey**, quatre réacteurs **REP de 900 MW** fissionnent de l'**uranium enrichi à $\approx 4\%$** : environ 3 kg d'uranium 235 par jour et par réacteur. La chaleur produit de la vapeur qui fait tourner une **turbine** et un **alternateur** (20 kV, 50 Hz) ; les deux tiers de la chaleur sont rendus au **Rhône** ou à l'atmosphère. La tension est élevée à **400 kV** pour diviser les **pertes Joule**, puis abaissée par étapes (**225 kV, 20 kV, 400 V / 230 V**) jusqu'aux prises de **Pont-de-Chéruy**. Au total, environ **30 %** de l'énergie libérée par la fission arrive au domicile ; un foyer consomme ainsi **moins d'un gramme d'uranium 235 par an**.