

Version professeur

Physique-chimie – Terminale Bac Pro

Cours et applications

Chapitre 1

Transporter l'énergie sous forme électrique

Édition : 26 septembre 2026 – Naïm Azzouz

Rappel de cours — Avant de commencer

Pour aborder ce chapitre, il faut savoir utiliser les relations $U = R \times I$ et $P = U \times I$, savoir qu'une tension alternative est donnée par sa **valeur efficace**, convertir avec les préfixes k (kilo) et M (méga) — W, kW, MW et V, kV — et calculer une énergie avec $E = P \times t$. La calculatrice est autorisée.

Repères et ordre de travail

Les codes désignent les capacités du chapitre, pas des codes officiels.

Capacité et intitulé complet	Partie du cours	Page
C1 – Représenter le schéma simplifié d'un réseau de distribution d'énergie électrique à l'échelle d'un pays et d'une installation domestique	§1	2 él. 2
Prérequis – Puissance, loi d'Ohm et valeur efficace	§2	5 él. 4
C2 – Calculer la puissance dissipée par effet Joule dans un conducteur à partir de sa résistance et de la valeur efficace de l'intensité ou de la tension	§3	6 él. 5
C3 – Justifier l'intérêt du transport d'énergie électrique à grande distance sous haute tension : les pertes en ligne	§4	8 él. 7
C3 (suite) – Pourquoi transporter sous haute tension ?	§5	9 él. 9
C4 – Mettre en évidence expérimentalement le rôle d'abaisseur ou d'élévateur de tension d'un transformateur	§6	11 él. 10
C5 – Connaître le rôle des transformateurs dans les réseaux de distribution et dans les appareils électriques d'utilisation courante	§7	14 él. 13
Bilan – Choisir la relation, vérifier sa réponse	Bilan	16 él. 14

« él. » : page du cours élève de cette même édition.

Méthode — Mode d'emploi

Lire la notion et l'exemple résolu, puis chercher l'application avant de passer à la notion suivante. Le travail peut être accompagné en classe ou repris seul. Les corrections suivent les applications dans cette version.

Les parties se lisent dans l'ordre : le §2 rappelle des outils déjà connus, utilisés dans tout le chapitre. Au §6, la relation entre tensions et nombres de spires est **toujours fournie** : ce qui s'apprend, c'est reconnaître et mettre en évidence un élévateur ou un abaisseur.

Indication

Cadre de travail. Documents et calculs, sans manipulation. Les scénarios et relevés d'entraînement sont des données fournies, non des mesures réalisées en classe. C4 prépare l'étude expérimentale du transformateur : sa réalisation reste à faire ultérieurement. Pour les lignes, on utilise un modèle monophasé résistif : $P = UI$ au départ, R constante pour l'aller-retour, puis $P_{\text{reçue}} = P - RI^2$. Les vérifications de seuils ne constituent pas un dimensionnement d'installation.

1 De la centrale à la prise : le réseau électrique (C1)

Définition — Réseau de transport et réseau de distribution

L'énergie électrique est produite dans des **centrales**, souvent loin des utilisateurs. Elle parcourt ensuite deux réseaux successifs :

- le **réseau de transport**, en **très haute tension** (THT : 400 kV ou 225 kV), puis en haute tension (90 kV ou 63 kV), qui achemine l'énergie sur de **grandes distances** entre régions et pays. En France, il est géré par RTE, sur environ 100 000 km de lignes ;
- le **réseau de distribution**, en moyenne tension (HTA : 20 kV) puis en **basse tension** (BT : 230 V / 400 V), qui apporte l'énergie jusqu'à chaque utilisateur. Il est géré principalement par Enedis, sur la majeure partie du territoire métropolitain.

Dans le réseau alternatif simplifié étudié, les changements de tension sont assurés par un **transformateur**.

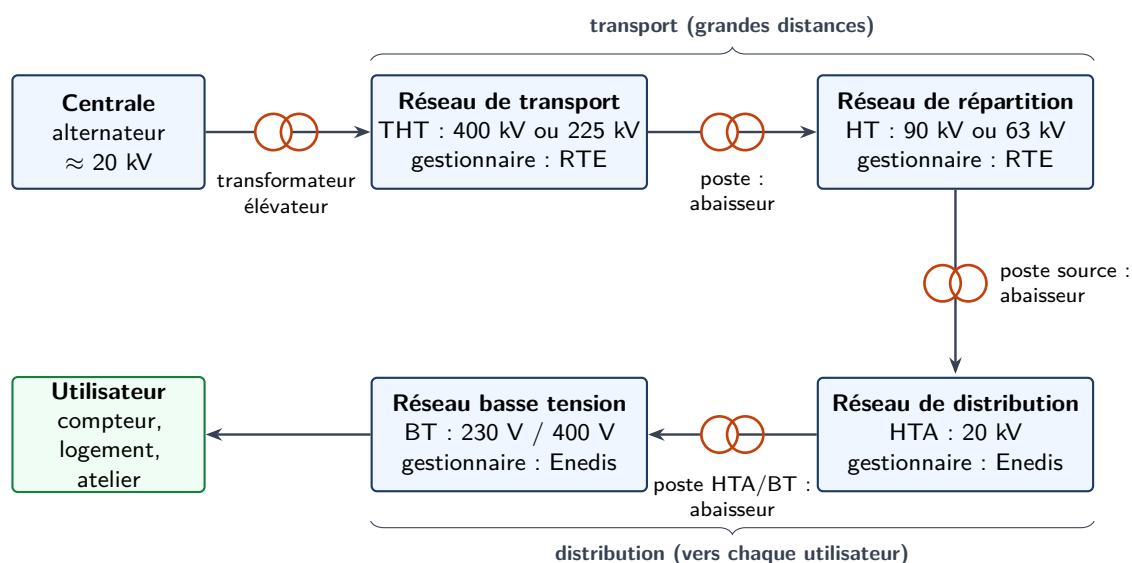


Schéma simplifié du réseau national. Les rectangles sont les niveaux de tension ; les deux cercles entrelacés représentent un transformateur. La tension est élevée une seule fois, à la sortie de la centrale, puis abaissée poste après poste jusqu'à l'utilisateur.

Remarque — Les postes

Un **poste source** relie le réseau de transport au réseau de distribution : il abaisse la haute tension en 20 kV. Un **poste HTA/BT**, appelé ici *poste de quartier*, abaisse les 20 kV en 400 V / 230 V. Un poste source peut aussi être alimenté directement en 225 kV : l'énergie ne passe pas forcément par tous les niveaux.

Méthode — Représenter le réseau en blocs

1. Placer les blocs dans l'ordre : centrale, transport, répartition, distribution, basse tension, utilisateur.
2. Relier deux blocs par une flèche dans le sens de l'énergie.
3. Placer un transformateur entre deux niveaux de tension, en précisant **élévateur** (la tension augmente) ou **abaisseur** (elle diminue).
- 4.

Écrire la tension dans chaque bloc, avec son unité.

Application 1 – Compléter le schéma du réseau

Le schéma ci-dessous reprend le réseau national, mais des informations ont été effacées.

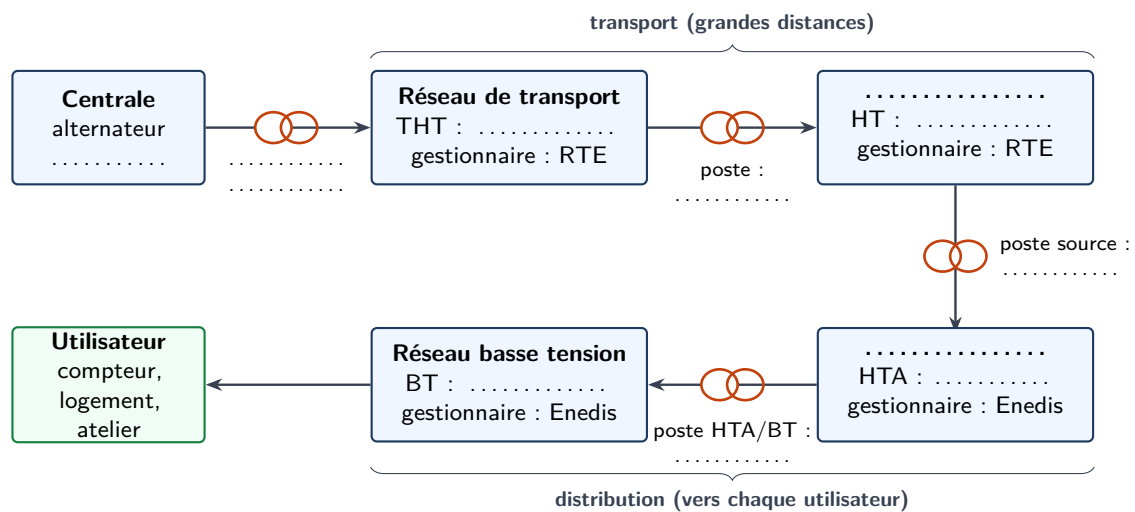


Schéma du réseau national à compléter : noms de deux réseaux, tensions et rôle de chaque transformateur.

- Compléter les noms des deux réseaux manquants.
- Compléter chaque tension avec les valeurs suivantes : 230 V / 400 V ; ≈ 20 kV ; 20 kV ; 400 kV ou 225 kV ; 90 kV ou 63 kV.
- Sous chaque transformateur, écrire *élévateur* ou *abaisseur*.
- Combien de fois la tension est-elle élevée entre la centrale et l'utilisateur ?

Correction — Application 1

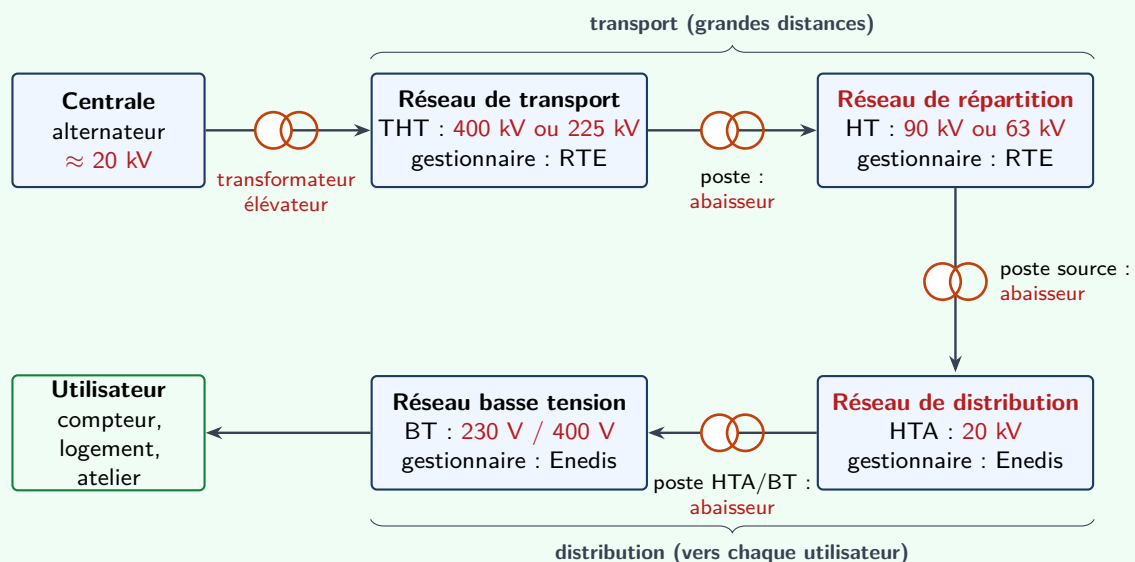


Schéma complété : réponses en rouge.

- Réseau de **répartition** (haute tension, RTE) ; réseau de **distribution** (HTA, Enedis).
- Centrale : ≈ 20 kV ; transport : 400 kV ou 225 kV ; répartition : 90 kV ou 63 kV ; distribution : 20 kV ; basse tension : 230 V / 400 V.
- Le premier transformateur est **élévateur** ; les trois autres (poste, poste source, poste HTA/BT) sont **abaisseurs**.
- Une seule fois**, à la sortie de la centrale. Ensuite, la tension ne fait que diminuer jusqu'à l'utilisateur.
Erreurs fréquentes : placer 20 kV à la fois pour la centrale et la distribution sans voir qu'il y a deux

transformations entre les deux ; écrire « élévateur » pour le poste source parce que « source » évoque une production. Accepter qu'un élève note qu'un poste source peut être alimenté directement en 225 kV.

L'installation domestique

Définition — De la rue aux prises

Chez l'utilisateur, l'énergie arrive par le réseau basse tension en 230 V. Elle traverse dans l'ordre :

- le **compteur**, qui mesure l'énergie consommée ;
- le **disjoncteur de branchement**, qui peut couper toute l'installation ; il est différentiel (500 mA). Le compteur et lui forment le panneau de contrôle. Le **point de livraison** est à la sortie de ce disjoncteur : avant, c'est le réseau public ; après, c'est l'installation de l'utilisateur ;
- le **tableau de répartition** : des **interrupteurs différentiels** 30 mA protègent les personnes contre les fuites de courant ; chacun alimente plusieurs **disjoncteurs divisionnaires**, un par circuit, qui protègent les câbles contre les surintensités ;
- les **circuits** : éclairage, prises, circuits spécialisés (plaque de cuisson...).

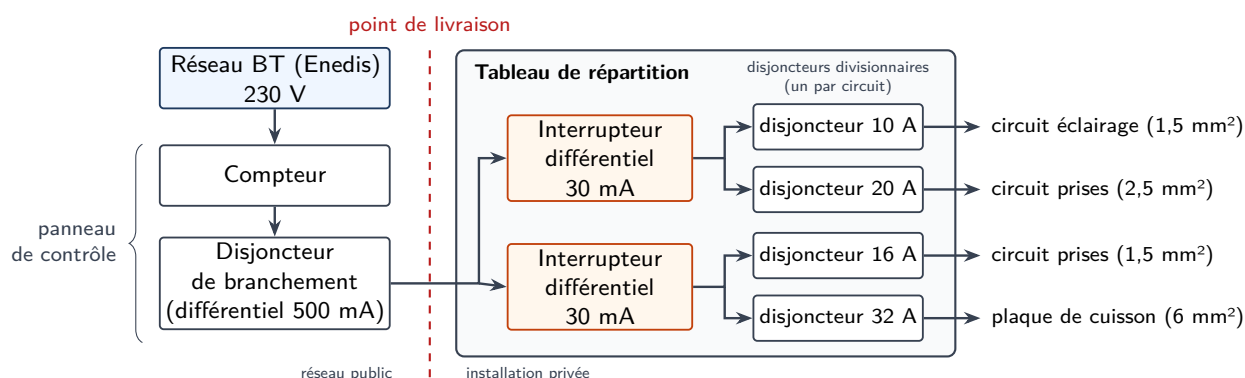


Schéma en blocs d'une installation domestique. À gauche, le panneau de contrôle ; la ligne rouge en pointillés marque le point de livraison ; à droite, le tableau de répartition, avec deux interrupteurs différentiels 30 mA en tête de rangée et un disjoncteur divisionnaire par circuit.

Erreur fréquente — Disjoncteur divisionnaire ou interrupteur différentiel ?

Le **disjoncteur divisionnaire** protège le *circuit* : il coupe si l'intensité est trop grande pour les câbles. L'**interrupteur différentiel** 30 mA protège les *personnes* : il coupe quand une partie du courant s'échappe par un autre chemin, par exemple à travers le corps. L'un ne remplace pas l'autre.

Application 2 – Retracer l'installation d'un logement

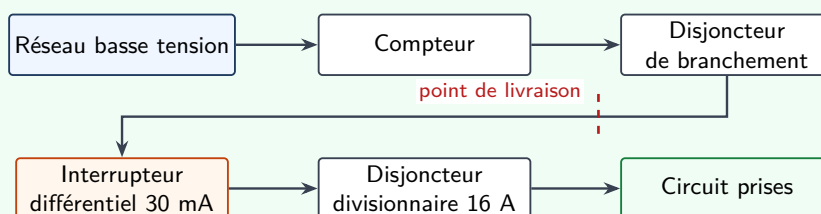
Voici, dans le désordre, les éléments d'une installation domestique :

disjoncteur divisionnaire 16 A – réseau basse tension – circuit prises – compteur – interrupteur différentiel 30 mA – disjoncteur de branchement.

- Tracer le schéma en blocs de cette installation, dans l'ordre suivi par l'énergie, avec des flèches.
- Marquer sur le schéma le point de livraison par un trait vertical.
- Quel appareil protège les personnes contre une fuite de courant ? Quel appareil protège les câbles du circuit prises ?

Correction — Application 2

a. et b. Schéma attendu (le trait rouge marque le point de livraison) :



Corrigé : chaîne de l'installation, du réseau au circuit prises ; le point de livraison est juste après le disjoncteur de branchement.

c. L'**interrupteur différentiel 30 mA** protège les personnes contre une fuite de courant. Le **disjoncteur divisionnaire 16 A** protège les câbles du circuit prises contre une intensité trop grande.

Erreurs fréquentes : placer le compteur après le disjoncteur de branchement ; mettre le point de livraison au compteur (il est à la sortie du disjoncteur de branchement) ; confondre les deux protections. Accepter toute disposition claire, en ligne ou en colonne, si l'ordre et le sens des flèches sont justes.

2 Rappels : puissance et loi d'Ohm (prérequis)

Rappel de cours — Trois relations déjà connues

Loi d'Ohm : la tension aux bornes d'un conducteur ohmique de résistance R est $U = R \times I$, avec U en volts (V), R en ohms (Ω), I en ampères (A).

Puissance électrique : $P = U \times I$, avec P en watts (W). Formules dérivées : $I = \frac{P}{U}$ et $U = \frac{P}{I}$.

Énergie : $E = P \times t$ (W et s donnent des J ; kW et h donnent des kWh).

Définition — Valeur efficace

Le réseau fournit une tension **alternative** : elle effectue 50 périodes par seconde (50 Hz). Les valeurs annoncées — 230 V, 20 kV, 400 kV — sont des **valeurs efficaces**. Un voltmètre ou un ampèremètre réglé en position alternatif ($\sim$ ou AC) affiche directement la valeur efficace. Dans tout le chapitre, U et I désignent des valeurs efficaces.

Remarque — Une simplification du chapitre

Pour la puissance transportée par une ligne, on utilise $P = U \times I$ comme pour un appareil de chauffage. C'est une simplification : pour un moteur, la relation exacte comporte un facteur supplémentaire, qui n'est pas étudié ici.

Exemple — Un radiateur de chantier

Un radiateur soufflant de 3 000 W est branché sous 230 V.

$$I = \frac{P}{U} = \frac{3\,000}{230} \approx 13,0 \text{ A.}$$

Conversions utiles : 400 kV = 400 000 V ; 500 MW = 500 000 000 W = 500×10^6 W.

Application 3 – Remettre les outils en main

- Un convecteur de 1 500 W fonctionne sous 230 V. Calculer l'intensité qui le traverse, arrondie au centième.
- En déduire la résistance de son élément chauffant, avec $R = \frac{U}{I}$, arrondie au dixième.
- Convertir : 225 kV en V ; 180 MW en W ; 6,25 MW en kW.
- Que représente la valeur 230 V affichée par un voltmètre réglé en position alternatif ?

Correction — Application 3

$$\text{a. } I = \frac{P}{U} = \frac{1\,500}{230} \approx 6,52 \text{ A.}$$

$$\text{b. } R = \frac{U}{I} = \frac{230}{6,52} \approx 35,3 \, \Omega.$$

$$\text{c. } 225 \text{ kV} = 225\,000 \text{ V} ; 180 \text{ MW} = 180\,000\,000 \text{ W} = 180 \times 10^6 \text{ W} ; 6,25 \text{ MW} = 6\,250 \text{ kW}.$$

d. C'est la **valeur efficace** de la tension alternative du secteur.

Conduite : au **b.**, un élève qui garde la valeur non arrondie de I trouve $35,27 \, \Omega$, soit aussi $35,3 \, \Omega$. Au **c.**, faire écrire le facteur : $k = 10^3$, $M = 10^6$; l'erreur classique est $6,25 \text{ MW} = 625 \text{ kW}$.

3 L'effet Joule (C2)**Définition — Effet Joule**

Un conducteur parcouru par un courant **s'échauffe** : une partie de l'énergie électrique est transformée en chaleur. C'est l'**effet Joule**. Il est utile dans un radiateur ou une bouilloire ; il est une **perte** dans un câble ou une ligne électrique.

Proposition — Puissance dissipée par effet Joule

Un conducteur de résistance R , parcouru par un courant d'intensité efficace I , dissipe la puissance

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

Si l'on connaît plutôt la tension efficace U_R **aux bornes du conducteur**, on peut écrire

$$P_J = \frac{U_R^2}{R}$$

P_J en watts (W), R en ohms (Ω), I en ampères (A), U_R en volts (V).

L'énergie dissipée pendant une durée t vaut $E = P_J \times t$.

Méthode — Calculer une puissance dissipée par effet Joule

1. Repérer la résistance R du conducteur, en ohms. **2.** Repérer la grandeur connue : l'intensité I qui le traverse, ou la tension U_R à ses bornes. **3.** Choisir $P_J = R \times I^2$ ou $P_J = U_R^2/R$. **4.** Calculer, écrire l'unité, puis vérifier avec l'autre relation si c'est possible ($U_R = R \times I$).

Exemple — Une rallonge de chantier de 25 m

Une rallonge de 25 m en câble souple de $1,5 \text{ mm}^2$ alimente un outil qui absorbe 16 A. Le courant parcourt 50 m de conducteur (aller et retour). Pour le calcul, on prend la résistance maximale à 20 °C donnée par Nexans pour un conducteur souple de $1,5 \text{ mm}^2$: $13,3 \, \Omega$ par kilomètre, supposée constante.

Résistance : $R = 13,3 \times 0,050 = 0,665 \, \Omega$.

Puissance dissipée : $P_J = R \times I^2 = 0,665 \times 16^2 = 0,665 \times 256 \approx 170 \text{ W}$.

Contrôle avec la tension : $U_R = R \times I = 0,665 \times 16 \approx 10,6 \text{ V}$ aux bornes des conducteurs, et

$$P_J = \frac{U_R^2}{R} = \frac{10,64^2}{0,665} \approx 170 \text{ W. } \checkmark$$

La rallonge chauffe comme une petite résistance de 170 W répartie sur toute sa longueur.

Erreur fréquente — U^2/R avec la mauvaise tension

Dans $P_J = U_R^2/R$, la tension est celle **aux bornes du conducteur** (quelques volts pour la rallonge), pas la tension du réseau dans le cas de cette rallonge. Avec 230 V, on trouverait $230^2/0,665 \approx 79\,500 \text{ W}$: ce

résultat ne décrit pas le fonctionnement étudié.

Application 4 – Une rallonge plus grosse

Une rallonge de 25 m en $2,5 \text{ mm}^2$ alimente un radiateur de chantier qui absorbe 13 A. Un conducteur de $2,5 \text{ mm}^2$ a une résistance d'environ $8,0 \Omega$ par kilomètre ; le courant parcourt 50 m de conducteur.

- Calculer la résistance R de la rallonge.
- Calculer la puissance P_J dissipée par effet Joule dans la rallonge.
- Calculer l'énergie dissipée en 4 h de fonctionnement, en Wh puis en kWh.

Correction — Application 4

- Longueur de conducteur : 50 m = 0,050 km, donc $R = 8,0 \times 0,050 = 0,40 \Omega$.
- $P_J = R \times I^2 = 0,40 \times 13^2 = 0,40 \times 169 = 67,6 \text{ W}$. La rallonge dissipe environ 68 W sous forme de chaleur.
- $E = P_J \times t = 67,6 \times 4 = 270,4 \text{ Wh}$, soit environ 0,27 kWh.

Erreurs fréquentes : prendre 25 m au lieu de 50 m (le courant fait l'aller et le retour) ; oublier le carré ($0,40 \times 13 = 5,2$ est la tension U_R , pas une puissance). *Prolongement oral* : la même intensité dans une rallonge de $1,5 \text{ mm}^2$ ($R = 0,665 \Omega$) donnerait $0,665 \times 169 \approx 112 \text{ W}$: un câble plus gros chauffe moins.

Application 5 – À partir de la chute de tension

Le câble qui alimente le tableau d'un atelier de menuiserie a une résistance totale $R = 0,30 \Omega$ (aller et retour). On donne, dans le modèle résistif étudié, une tension $U_R = 6,9 \text{ V}$ aux bornes de ses conducteurs.

- Calculer la puissance dissipée par effet Joule dans le câble.
- Calculer l'intensité qui parcourt le câble, puis vérifier le résultat du a. avec $P_J = R \times I^2$.
- Un camarade écrit : $P_J = \frac{230^2}{0,30} \approx 176\,000 \text{ W}$. Expliquer son erreur.

Correction — Application 5

- On connaît la tension *aux bornes du conducteur* : $P_J = \frac{U_R^2}{R} = \frac{6,9^2}{0,30} = \frac{47,61}{0,30} \approx 158,7 \text{ W}$.
- $I = \frac{U_R}{R} = \frac{6,9}{0,30} = 23 \text{ A}$; $P_J = R \times I^2 = 0,30 \times 23^2 = 0,30 \times 529 = 158,7 \text{ W}$. Les deux calculs concordent. ✓
- 230 V est la tension du réseau, entre les deux conducteurs, et non la tension *le long* du câble. La tension aux bornes des conducteurs n'est que de 6,9 V. Son résultat, 176 kW, dépasse de très loin la puissance d'un atelier alimenté par un tel câble : il est absurde.

Conduite : c'est l'erreur la plus fréquente du chapitre ; faire comparer l'ordre de grandeur obtenu à la puissance de l'atelier avant de corriger le calcul.

Application 6 – L'enrouleur qui chauffe

Sur un enrouleur de chantier de 25 m (câble de $1,5 \text{ mm}^2$, résistance $0,665 \Omega$ aller et retour), on lit : « câble enroulé 1 000 W ; câble déroulé 3 500 W ».

- Une scie absorbe 15 A. Calculer la puissance dissipée dans le câble.
- La puissance dissipée dépend-elle du fait que le câble soit enroulé ou déroulé ? Justifier avec la relation du cours.
- Expliquer pourquoi le fabricant limite pourtant la puissance à 1 000 W quand le câble reste enroulé.

Correction — Application 6

- $P_J = R \times I^2 = 0,665 \times 15^2 = 0,665 \times 225 \approx 150 \text{ W}$.
- Non.** $P_J = R \times I^2$ ne dépend que de la résistance du câble et de l'intensité : enroulé ou déroulé, le

câble produit la même chaleur à résistance et intensité fixées.

c. Enroulé, le câble évacue mal la chaleur : les spires serrées se chauffent les unes les autres, la température monte et l'isolant peut fondre (risque de court-circuit et d'incendie). En limitant la puissance à 1 000 W, on limite l'intensité à environ $1\,000/230 \approx 4,3$ A et la chaleur produite à environ $0,665 \times 4,35^2 \approx 13$ W, dans ce modèle à résistance constante ; la notice reste la référence.

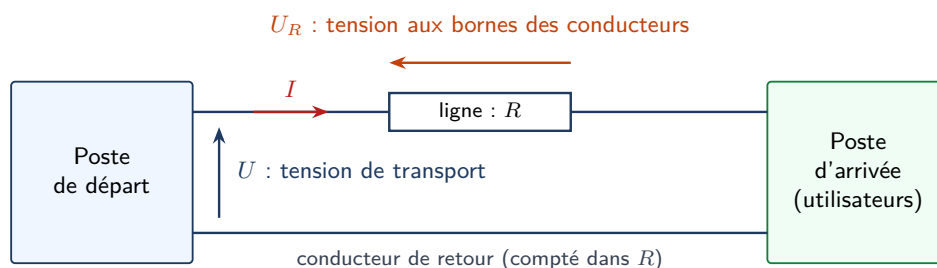
Conduite : distinguer la *puissance produite* (la même à résistance et intensité fixées) de la *température atteinte* (qui dépend de l'évacuation de la chaleur). Consigne de chantier à retenir : dérouler complètement l'enrouleur dès qu'on branche un outil puissant.

4 Les pertes en ligne (C3)

Définition — Pertes en ligne

Une ligne électrique est faite de conducteurs qui ont une résistance R . Quand elle transporte une puissance P sous la tension U , le courant qui la parcourt la fait chauffer : la puissance dissipée par effet Joule dans la ligne s'appelle les **pertes en ligne**. L'utilisateur reçoit seulement

$$P_{\text{reçue}} = P - P_J$$



Modèle d'une ligne : le poste de départ impose la tension de transport U ; la résistance R regroupe les conducteurs aller et retour ; U_R est la tension, beaucoup plus petite, aux bornes de ces conducteurs.

Méthode — Calculer les pertes d'une ligne

1. Convertir : P en watts, U en volts.
2. Intensité dans la ligne : $I = \frac{P}{U}$.
3. Pertes : $P_J = R \times I^2$.
4. Puissance reçue : $P_{\text{reçue}} = P - P_J$.
5. Pourcentage de pertes : $\frac{P_J}{P} \times 100$.

Exemple — Une ligne 400 kV de 100 km

Une ligne transporte $P = 500$ MW sous $U = 400$ kV. Sa résistance, aller et retour, vaut $R = 4 \Omega$.

1. $P = 500 \times 10^6$ W et $U = 400\,000$ V.

2. $I = \frac{500 \times 10^6}{400\,000} = 1\,250$ A.

3. $P_J = 4 \times 1\,250^2 = 6\,250\,000$ W = 6,25 MW.

4. $P_{\text{reçue}} = 500 - 6,25 = 493,75$ MW.

5. $\frac{6,25}{500} \times 100 = 1,25$ % de pertes.

Contrôle : $U_R = R \times I = 4 \times 1\,250 = 5\,000$ V et $\frac{U_R^2}{R} = \frac{5\,000^2}{4} = 6,25$ MW. ✓

Erreur fréquente — La tension de transport n'est pas U_R

$\frac{U^2}{R} = \frac{400\,000^2}{4} = 40\,000 \text{ MW}$: quatre-vingts fois la puissance transportée ! Ce calcul utilise la tension *entre les conducteurs*, pas la tension *le long d'un conducteur*. Pour une ligne, on calcule d'abord $I = P/U$, puis $P_J = R \times I^2$.

Remarque — Et sur les réseaux de distribution ?

Les conducteurs et les transformateurs y dissipent aussi de l'énergie. Le taux global dépend du réseau et de ses conditions de fonctionnement : il ne se déduit pas du seul niveau de tension.

Application 7 – Une ligne 225 kV

Une ligne transporte $P = 180 \text{ MW}$ sous $U = 225 \text{ kV}$. Sa résistance, aller et retour, vaut $R = 5 \Omega$.

- Calculer l'intensité I dans la ligne.
- Calculer les pertes en ligne P_J , en W puis en MW.
- Calculer la puissance reçue et le pourcentage de pertes, arrondi au dixième.
- Calculer la tension U_R aux bornes des conducteurs, puis vérifier P_J avec $P_J = U_R^2/R$.

Correction — Application 7

a. $P = 180 \times 10^6 \text{ W}$ et $U = 225\,000 \text{ V}$: $I = \frac{P}{U} = \frac{180 \times 10^6}{225\,000} = 800 \text{ A}$.

b. $P_J = R \times I^2 = 5 \times 800^2 = 5 \times 640\,000 = 3\,200\,000 \text{ W} = 3,2 \text{ MW}$.

c. $P_{\text{reçue}} = 180 - 3,2 = 176,8 \text{ MW}$; $\frac{3,2}{180} \times 100 \approx 1,8 \%$ de pertes.

d. $U_R = R \times I = 5 \times 800 = 4\,000 \text{ V}$, soit 4 kV, petite devant 225 kV. $P_J = \frac{4\,000^2}{5} = \frac{16 \times 10^6}{5} = 3,2 \text{ MW}$.
✓

Erreurs fréquentes : oublier de convertir les MW et les kV (on trouve alors $I = 0,8 \text{ A}$) ; calculer $225\,000^2/5$, soit 10 125 MW, plus de cinquante fois la puissance transportée.

5 Pourquoi transporter sous haute tension ? (C3)**Proposition — Effet de la tension sur les pertes**

Pour une même puissance P transportée et une même ligne de résistance R :

— si la tension U est **multipliée par k** , l'intensité $I = P/U$ est **divisée par k** ;

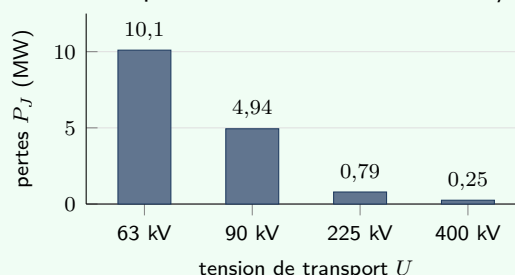
— les pertes $P_J = R \times I^2$ sont alors **divisées par k^2** .

Doubler la tension divise les pertes par $2^2 = 4$; la multiplier par 10 les divise par 100.

Exemple — Même puissance, quatre tensions

On transporte $P = 100 \text{ MW}$ sur une ligne de résistance $R = 4 \Omega$, sous quatre tensions du réseau français.

Tension U	63 kV	90 kV	225 kV	400 kV
$I = P/U$ (A)	1 587	1 111	444	250
$P_J = RI^2$ (MW)	10,1	4,94	0,79	0,25
Pertes (%)	10,1	4,9	0,8	0,25



Pertes pour 100 MW sur une ligne de 4Ω : plus la tension est haute, plus les pertes sont faibles.

De 90 kV à 225 kV, la tension est multipliée par $225/90 = 2,5$; les pertes sont divisées par $2,5^2 = 6,25$: $4,94/6,25 \approx 0,79$. ✓

Application 8 – Compléter le tableau des pertes

On transporte $P = 90 \text{ MW}$ sur une ligne de résistance $R = 5 \Omega$.

Tension U	90 kV	225 kV	400 kV
Intensité I (A)			
Pertes P_J (kW)			
Pourcentage de pertes			

- Compléter le tableau (pourcentages arrondis au centième).
- Par combien la tension est-elle multipliée entre 90 kV et 225 kV ? Par combien les pertes sont-elles divisées ? Vérifier la propriété du cours.
- Sans calcul de pertes : si l'on multipliait la tension par 3, par combien les pertes seraient-elles divisées ?

Correction — Application 8

Tension U	90 kV	225 kV	400 kV
Intensité $I = P/U$ (A)	1 000	400	225
Pertes $P_J = RI^2$ (kW)	5 000	800	≈ 253
Pourcentage de pertes	5,56 %	0,89 %	0,28 %

- Détail pour 90 kV : $I = \frac{90 \times 10^6}{90\,000} = 1\,000 \text{ A}$; $P_J = 5 \times 1\,000^2 = 5\,000\,000 \text{ W} = 5\,000 \text{ kW}$; $\frac{5}{90} \times 100 \approx 5,56 \%$. Même démarche pour les deux autres colonnes ($5 \times 225^2 = 253\,125 \text{ W}$).
- $225/90 = 2,5$: la tension est multipliée par 2,5. $5\,000/800 = 6,25$: les pertes sont divisées par 6,25, et $2,5^2 = 6,25$. La propriété est vérifiée.
- Par $3^2 = 9$.

Erreur fréquente : répondre « par 3 » au c. ; faire repasser par l'intensité, divisée par 3, puis par le carré.

Remarque — Pourquoi ne pas monter encore plus haut, ni garder la THT jusqu'aux prises ?

Plus la tension est élevée, plus il faut **isoler** : grands isolateurs, grandes distances entre les câbles et avec le sol, donc des **pylônes** hauts et coûteux. Une très haute tension est aussi **mortellement dangereuse** à distance, sans contact. C'est pourquoi on transporte en très haute tension sur les longues distances, puis on **abaisse** la tension, poste après poste, avant d'arriver chez l'utilisateur.

Application 9 – Justifier la très haute tension

En 2025, les pertes du réseau de transport français ont été d'environ 11,9 TWh, pour une consommation corrigée des effets météo et calendaires de 451 TWh. Sources : CRE, délibération du 21 mai 2026 (pertes provisoires) ; RTE, bilan 2025. Pour une estimation, appliquer la part indicative de 78 % publiée par RTE, qui ne constitue pas une ventilation mesurée de l'année 2025.

- Calculer le rapport pertes / consommation corrigée, en pourcentage, arrondi au dixième. Ce rapport n'est pas le taux de pertes sur l'énergie injectée.
- Calculer l'énergie perdue par effet Joule dans le réseau de transport.
- En trois phrases, en utilisant $I = P/U$ et $P_J = R \times I^2$, justifier que l'on transporte l'énergie sous très haute tension.
- Donner deux raisons pour lesquelles on abaisse la tension avant l'utilisateur.

Correction — Application 9

- $\frac{11,9}{451} \times 100 \approx 2,6\%$ pour le rapport à la consommation corrigée. Ce résultat n'est pas un taux de pertes sur l'énergie injectée.
- $0,78 \times 11,9 \approx 9,3$ TWh pour une estimation par effet Joule, si l'on applique cette répartition indicative.
- Réponse possible : « Pour une puissance donnée, l'intensité dans la ligne vaut $I = P/U$: plus la tension est élevée, plus l'intensité est faible. Les pertes par effet Joule valent $P_J = R \times I^2$: elles diminuent comme le carré de l'intensité. Transporter sous très haute tension réduit donc fortement les pertes sur les grandes distances. »
- Deux raisons parmi : une très haute tension est très dangereuse pour les personnes, même sans contact ; elle exige un isolement important (grands isolateurs, grandes distances, pylônes hauts et coûteux), impossible dans un logement ou un atelier ; les appareils sont prévus pour 230 V ou 400 V.

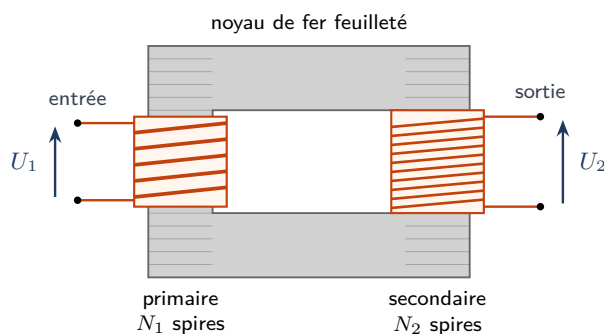
Conduite : au c., exiger les deux relations et le mot « carré ». Une réponse « la haute tension perd moins d'énergie » sans justification n'est pas une justification.

6 Le transformateur : élever ou abaisser une tension (C4)**Définition — Transformateur**

Un **transformateur** est formé de **deux bobines** de fil de cuivre isolé, enroulées sur un même **noyau de fer feuilleté** (fait de tôles minces empilées) :

- le **primaire**, relié à l'alimentation : tension U_1 , N_1 spires, intensité I_1 ;
- le **secondaire**, relié à l'utilisation : tension U_2 , N_2 spires, intensité I_2 .

Il fonctionne **uniquement en alternatif**. Il est **élévateur** si $U_2 > U_1$, **abaisseur** si $U_2 < U_1$.

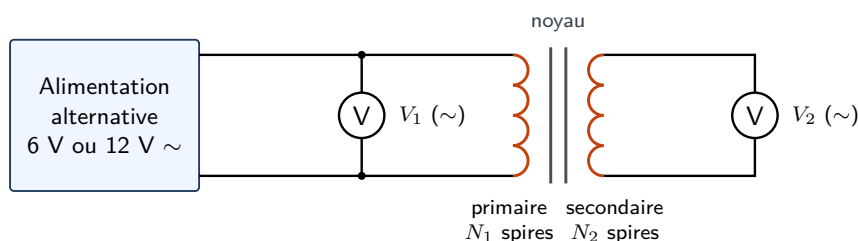


Transformateur : les deux bobines ne se touchent pas ; elles sont seulement reliées par le noyau de fer. Ici, le secondaire a plus de spires que le primaire.

Préparer une mise en évidence expérimentale

Méthode — Étudier un protocole sur papier

Repérer le primaire, le secondaire et les deux voltmètres sur le schéma. Les voltmètres se branchent en dérivation et se règlent en alternatif (AC). Pour conclure, on comparerait les valeurs efficaces U_1 et U_2 . Aucun montage n'est demandé ici. Une future séance sera préparée selon le matériel disponible et ses notices. Une bobine ordinaire ne doit jamais être reliée au secteur. Dans les exercices, le scénario fixe une limite de 25 V au secondaire.



Montage de mise en évidence : l'alimentation alternative basse tension alimente le primaire ; le voltmètre V_1 mesure U_1 , le voltmètre V_2 mesure U_2 , tous deux en position alternatif.

Exemple — Deux montages idéaux calculés

Montage	N_1	N_2	U_1 calculée	U_2 calculée
A	500	1 000	6,0 V	12,0 V
B	1 000	500	12,0 V	6,0 V

Montage A : $U_2 > U_1$, le transformateur est **élévateur** ; le secondaire a plus de spires que le primaire.

Montage B : $U_2 < U_1$, il est **abaisseur** ; le secondaire a moins de spires.

En régime continu établi, le flux ne varie plus : aucune tension n'est induite au secondaire. Ce constat ne demande pas d'essai avec une pile.

Proposition — Complément fourni : tensions et nombres de spires

Pour un transformateur idéal,

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad \text{donc} \quad U_2 = U_1 \times \frac{N_2}{N_1}$$

Cette relation est **toujours donnée** dans les énoncés. Montage A : valeur idéale $6,0 \times \frac{1\,000}{500} = 12\text{ V}$; la valeur fournie, 12,0 V, coïncide avec le résultat calculé par construction. Cela ne valide pas un transformateur réel.

Application 10 – Exploiter un modèle

Trois montages idéaux sont étudiés sur papier. Les tensions du tableau sont calculées, non calculées.

Montage	N_1	N_2	U_1 calculée	U_2 calculée
1	250	500	6,0 V	12,0 V
2	1 000	250	12,0 V	3,0 V
3	500	500	6,0 V	6,0 V

Donnée : pour un transformateur idéal,

$$U_2 = U_1 \times \frac{N_2}{N_1}$$

- Pour chaque montage, dire si le transformateur est élévateur, abaisseur ou ni l'un ni l'autre. Justifier avec les valeurs fournies.
- Calculer la tension U_2 idéale de chaque montage et la comparer à la valeur fournie.
- Le groupe veut tester $U_1 = 12$ V avec $N_1 = 250$ et $N_2 = 1 000$. Calculer U_2 idéale. Ce montage est-il autorisé ? Justifier.

Correction — Application 10

- 1 : $12 > 6$, élévateur. 2 : $3 < 12$, abaisseur. 3 : $6 = 6$, ni élévateur ni abaisseur dans le modèle idéal.
- $6 \times 500/250 = 12$ V ; $12 \times 250/1000 = 3$ V ; $6 \times 500/500 = 6$ V. Le tableau est construit avec cette relation : son accord ne constitue pas une vérification expérimentale.
- $12 \times 1000/250 = 48$ V, au-dessus de la limite de 25 V fixée dans le scénario : proposition refusée. Aucune manipulation n'est demandée.

Application 11 – Un protocole à corriger

Un élève propose le protocole suivant pour montrer qu'un transformateur abaisse la tension.

« Je branche la bobine de 1 000 spires sur une prise 230 V de la salle. J'alimente ensuite le montage avec une pile de 9 V, plus sûre. Je règle les deux multimètres en position continu (DC) et je relève U_1 et U_2 . »

- Relever trois erreurs dans ce protocole et expliquer pourquoi chacune est une erreur.
- Avec la pile, en régime établi après le bref transitoire, que va indiquer le voltmètre du secondaire ? Pourquoi ?
- Réécrire un protocole correct pour mettre en évidence le rôle d'**abaisseur** (alimentation, bobines choisies, réglage des voltmètres, résultat attendu).

Correction — Application 11

a. Trois erreurs :

- brancher une bobine sur une prise 230 V : **dangereux et interdit** ; une bobine ordinaire ne se branche jamais sur le secteur, on utilise l'alimentation basse tension du poste ;
- la pile fournit du **continu** : le transformateur ne fonctionne qu'en alternatif ;
- les multimètres en position **continu** (DC) : les tensions sont alternatives, il faut la position alternatif ($\sim$, AC).

b. Le voltmètre du secondaire indique 0 V : une tension continue ne fait pas fonctionner le transformateur.

c. Protocole possible : alimentation coupée, monter une bobine de 1 000 spires au primaire et une de 500 spires au secondaire, fermer le noyau ; relier le primaire à l'alimentation alternative 12 V ; brancher un voltmètre aux bornes de chaque bobine, en position alternatif ; mettre sous tension, relever U_1 et U_2 , couper. Résultat attendu : U_2 proche de 6 V (un peu moins), inférieure à U_1 : le transformateur est **abaisseur**.

Conduite : valoriser la mention « alimentation coupée pendant le câblage » et le choix de bobines qui respecte la limite de 25 V. Accepter 1 000 et 250 spires (≈ 3 V).

Remarque — Le transformateur parfait conserve la puissance

Un transformateur parfait transmet au secondaire toute la puissance reçue au primaire : $U_1 \times I_1 = U_2 \times I_2$. Quand il **élève** la tension, il **abaisse** l'intensité dans la même proportion. C'est ce qui rend le transport en très haute tension intéressant : à la sortie de la centrale, le transformateur élévateur diminue l'intensité,

donc les pertes en ligne.

7 Les transformateurs autour de nous (C5)

Définition — Le rôle des transformateurs

Un transformateur **adapte la tension** à chaque usage.

- **Dans le réseau** : un transformateur **élevateur** à la sortie de la centrale (environ 20 kV élevés à 400 kV) pour transporter avec peu de pertes ; des transformateurs **abaisseurs** dans les postes, le poste source (vers 20 kV) et le poste de quartier (vers 400 V / 230 V), pour une tension adaptée aux appareils ; le 230 V reste dangereux.
- **Dans les appareils** : presque toujours **abaisseurs**, pour obtenir une basse tension à partir du secteur 230 V.

Appareil	Tensions	Rôle
Chargeur de téléphone	230 V $\sim$ $\rightarrow$ 5 V continu	conversion électronique avec transformateur et redressement
Éclairage très basse tension	230 V $\rightarrow$ 12 V	abaisseur de sécurité
Sonnette	230 V $\rightarrow$ 8 V ou 12 V	abaisseur, dans le tableau
Transformateur de chantier	230 V $\rightarrow$ 24 V	abaisseur de sécurité (baladeuses, appareils compatibles)
Poste à souder à l'arc	230 V $\rightarrow$ environ 50 V à vide	abaisseur ; fournit une forte intensité (100 A à 150 A)

Transformateurs d'appareils courants : ils abaissent tous la tension du secteur.

Remarque — Tension réduite et sécurité

Abaissier la tension peut réduire le risque électrique, mais sa seule valeur ne garantit pas la sécurité : celle-ci dépend aussi du matériel, de son isolation et des conditions d'utilisation. Une tension de 230 V reste dangereuse. On étudie ici des documents, sans intervenir sur une installation.

TRANSFORMATEUR DE SÉCURITÉ PORTATIF

Primaire : 230 V $\sim$ 50 Hz	IP 44
Secondaire : 24 V $\sim$	Classe II
Puissance : 1 000 VA	
TBTS	Année : 2025

Plaque signalétique d'entraînement, inventée pour ce cours : tension du primaire, tension du secondaire et puissance du transformateur.

Méthode — Lire la plaque d'un transformateur

1. Repérer la tension d'entrée (primaire) et la tension de sortie (secondaire) : comparer pour dire élévateur ou abaisseur.
2. Complément fourni : la puissance apparente S est écrite en **voltampères** (VA) : c'est le produit $U \times I$ que l'appareil peut fournir. L'intensité maximale au secondaire vaut donc $I_2 = \frac{\text{puissance}}{U_2}$.

Exemple — Le transformateur de sonnette

Un transformateur de sonnette de 8 VA fournit 8 V.

Intensité maximale au secondaire : $I_2 = \frac{8}{8} = 1 \text{ A}$.

S'il est parfait, le primaire, sous 230 V, est traversé par $I_1 = \frac{8}{230} \approx 0,035 \text{ A}$: côté basse tension, l'intensité est plus grande.

Application 12 – Élévateur ou abaisseur ?

a. Compléter le tableau.

Transformateur	Élévateur ou abaisseur ?	Où se trouve-t-il ?
Sortie de centrale : 20 kV → 400 kV		
Poste source : 63 kV → 20 kV		
Poste de quartier : 20 kV → 400 V / 230 V		
Éclairage de vitrine : 230 V → 12 V		
Poste à souder : 230 V → environ 50 V		

Pour la dernière colonne, écrire *réseau* ou *appareil*.

b. Un chargeur de téléphone fournit 5 V **continu** à partir du secteur. Un transformateur ne fonctionne pourtant qu'en alternatif : expliquer comment le chargeur obtient du continu.

Correction — Application 12

Transformateur	Rôle	Lieu
Sortie de centrale : 20 kV → 400 kV	élévateur	réseau
Poste source : 63 kV → 20 kV	abaisseur	réseau
Poste de quartier : 20 kV → 400 V / 230 V	abaisseur	réseau
Éclairage de vitrine : 230 V → 12 V	abaisseur	appareil
Poste à souder : 230 V → environ 50 V	abaisseur	appareil

a. On compare la tension de sortie à la tension d'entrée : un seul transformateur élève la tension, celui de la centrale.

b. Le chargeur contient un **transformateur abaisseur**, qui fonctionne en alternatif, suivi d'une **électronique qui redresse** la tension pour la rendre continue.

Conduite : faire remarquer que tous les transformateurs d'appareils du tableau sont abaisseurs. Le fonctionnement interne du chargeur n'est pas à détailler.

Application 13 – La plaque du transformateur de chantier

On utilise le transformateur de la plaque ci-dessus pour alimenter des baladeuses dans un atelier équipé pour ces appareils.

a. Relever U_1 et U_2 . Le transformateur est-il élévateur ou abaisseur ?

b. Calculer l'intensité maximale que peut fournir le secondaire, arrondie au dixième.

c. Le transformateur est supposé parfait. Calculer l'intensité au primaire quand il fournit sa puissance maximale. Quel côté est parcouru par la plus grande intensité ?

d. Pourquoi utilise-t-on ce transformateur plutôt que des baladeuses en 230 V ?

Correction — Application 13

- a. $U_1 = 230 \text{ V}$ (primaire), $U_2 = 24 \text{ V}$ (secondaire) : $U_2 < U_1$, le transformateur est **abaisseur**.
- b. $I_2 = \frac{1\,000}{24} \approx 41,7 \text{ A}$.
- c. $U_1 \times I_1 = 1\,000 \text{ VA}$, donc $I_1 = \frac{1\,000}{230} \approx 4,35 \text{ A}$. Le **secondaire** (basse tension) est parcouru par la plus grande intensité : quand la tension baisse, l'intensité augmente.
- d. Le transformateur fournit la tension de 24 V adaptée aux baladeuses étudiées. Réduire la tension peut réduire le risque électrique, mais la sécurité dépend aussi du matériel et des conditions d'utilisation ; sa valeur seule ne suffit pas. *Erreurs fréquentes* : diviser 1 000 par 230 au **b**. (intensité du primaire, pas du secondaire) ; croire que le côté basse tension a aussi la plus petite intensité.

Bilan – Je sais faire**À retenir**

Le réseau : centrale ($\approx 20 \text{ kV}$) $\rightarrow$ élévateur $\rightarrow$ transport THT (400 ou 225 kV) $\rightarrow$ postes abaisseurs (90 ou 63 kV) $\rightarrow$ poste source $\rightarrow$ HTA 20 kV $\rightarrow$ poste de quartier $\rightarrow$ BT 230 V / 400 V $\rightarrow$ compteur, disjoncteur de branchement, tableau.

Effet Joule : $P_J = R \times I^2 = \frac{U_R^2}{R}$, avec U_R tension aux bornes du conducteur.

Transport : tension $\times k \Rightarrow$ intensité $\div k \Rightarrow$ pertes $\div k^2$.

Transformateur : alternatif seulement ; élévateur si $U_2 > U_1$, abaisseur si $U_2 < U_1$; $\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$ est fournie.

Méthode — Choisir la bonne relation

Je connais. . .	J'utilise. . .
R et I dans le conducteur	$P_J = R \times I^2$
R et la tension U_R aux bornes du conducteur	$P_J = U_R^2 / R$
P transportée et tension U de transport	d'abord $I = P/U$, puis $P_J = R \times I^2$
P_J et une durée t	$E = P_J \times t$
U_1, N_1, N_2 (relation fournie)	$U_2 = U_1 \times N_2 / N_1$

Méthode — Vérifier sa réponse

1. Ai-je converti les kV en V et les MW en W avant de calculer ? 2. Les pertes sont-elles *petites* devant la puissance transportée (quelques pour cent au plus) ? Un pourcentage supérieur à 100 % signale une erreur. 3. U_R est-elle petite devant la tension de transport ? 4. Pour un transformateur, $U_2 > U_1$ va-t-il bien avec $N_2 > N_1$? 5. Ma réponse finit-elle par une phrase avec l'unité ?

Erreur fréquente — Les erreurs du chapitre

1. Calculer $P_J = U^2/R$ avec la **tension de transport** : on trouve des pertes plus grandes que la puissance transportée. La tension à utiliser est U_R . 2. Croire que multiplier la tension par k divise les pertes par k : c'est par k^2 . 3. Brancher un transformateur sur du continu, ou régler le voltmètre en DC. 4. Inverser N_1 et N_2 : un élévateur doit donner $U_2 > U_1$. 5. Confondre l'interrupteur différentiel (protection des personnes) et le disjoncteur divisionnaire (protection du circuit).

Remarque — Ce que ce chapitre ne demande pas

Le triphasé, le facteur de puissance, le rendement d'un transformateur réel et le calcul d'une résistance à partir de la résistivité du métal ne sont pas au programme de ce chapitre.

Sources des repères documentaires

Réseau : RTE, fonctionnement du transport ; Enedis, poste HTA/BT. Câbles : Nexans, classification IEC 60228 (2021). Enrouleur : Brennenstuhl, Standard PRO 25 m H07RN-F 3G1,5. Sonnerie : Legrand, référence 413091. Pertes 2025 : CRE, délibération 2026-104, p. 24 (11,92 TWh provisoires, arrondis ici à 11,9) ; RTE, bilan électrique 2025 (451 TWh corrigés). Répartition indicative : RTE, pertes en ligne. Sources contrôlées le 26 septembre 2026. Les autres valeurs sont des hypothèses d'exercice.