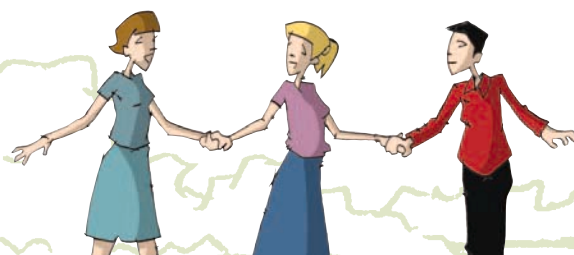




CHAPITRE

3



**UNE MISSION ESSENTIELLE :
GARANTIR LA SÛRETÉ
DE FONCTIONNEMENT
DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE FRANÇAIS**

UNE MISSION ESSENTIELLE : GARANTIR

La maîtrise de la sûreté de fonctionnement du système électrique (ou sûreté du système) est au cœur des responsabilités confiées par la loi à RTE. Elle se définit comme l'aptitude à :

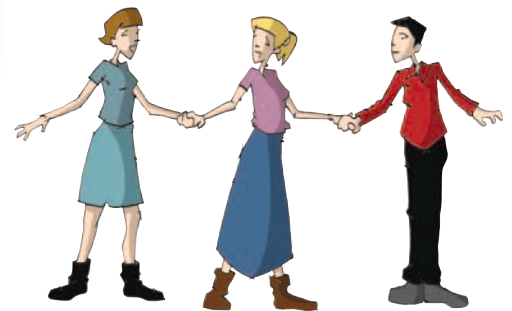
- assurer le fonctionnement normal du système ;
- limiter le nombre d'incidents et éviter les grands incidents ;
- limiter les conséquences des grands incidents lorsqu'ils se produisent.

Il peut arriver qu'un événement important au niveau de la production, du réseau ou de la consommation amorce un scénario exceptionnel qui peut aboutir à une panne étendue ou « blackout ».

Ce type d'incident de grande ampleur a toujours pour origine l'un ou plusieurs des quatre grands phénomènes suivants, qui se succèdent et/ou se conjuguent :

- les surcharges en cascade ;
- l'écroulement de la tension ;
- l'écroulement de la fréquence ;
- la rupture de synchronisme.

Ces phénomènes sont décrits dans la suite de ce chapitre.



Certains grands réseaux électriques de pays industrialisés ont connu des pannes importantes ces dernières années. **En Italie** par exemple, 57 millions de personnes ont été coupées pendant plusieurs heures en septembre 2003. **Aux États-Unis et au Canada**, ce sont 50 millions de personnes qui ont été privées d'électricité pendant plusieurs heures en août 2003. En 25 ans, la France a, pour sa part, connu deux « blackout » : sur l'ensemble du pays en 1978, et sur le grand ouest (jusqu'à l'Île-de-France) en 1987.

Depuis 1987, grâce à une organisation prévoyante et fiable, le **réseau de transport français n'a pas connu de coupure généralisée**. Lors des tempêtes de décembre 1999, exceptionnelles par leur intensité et par leur étendue géographique, le fonctionnement global du système a été préservé, malgré les coupures. Celles-ci ont résulté d'avaries de matériels nombreuses et dispersées.

C'est **pour éviter une panne étendue dans la zone du Cotentin** et une amplification des problèmes de tension dans l'ouest de la France, que **RTE propose de construire une ligne à 400 000 volts**, pour faire face à la hausse de production résultant de l'installation d'un nouveau groupe de production à Flamanville.

Pour bien comprendre l'utilité de cette ligne, il faut d'abord connaître les principes de fonctionnement du système électrique.



LES CONSÉQUENCES DES « BLACKOUT »

Le rapport final du « Groupe de travail États-Unis-Canada sur la panne de courant du 14 août 2003 dans le nord-est des États-Unis et au Canada indique : « La panne a coûté entre 4 et 10 milliards de dollars américains aux États-Unis. Le produit intérieur brut canadien a baissé de 0,7 % en août, et il y a eu une perte nette de 18,9 millions d'heures de travail. L'expédition de produits de manufacture a baissé de 2,3 milliards de dollars canadiens ».

Le coût de la panne qui a affecté la France le 19 décembre 1978 a été estimé à 1 800 millions de francs, sur la seule base du coût de l'énergie non distribuée en vigueur à l'époque (environ 800 millions d'euros actuels compte-tenu de l'inflation). Il faut lui ajouter celui de la baisse du produit intérieur brut résultant de la panne.

Par ailleurs, les « blackout » sont susceptibles de causer des décès (crises cardiaques, accidents dus à l'arrêt des feux de circulation, non démarrage de groupes électrogènes dans des hôpitaux...).

LA SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE FRANÇAIS

L'électricité, un produit pas comme les autres

LES DEUX TYPES DE COURANT ÉLECTRIQUE

- ◆ **Le courant alternatif** oscille à une fréquence de 50 Hz pour le réseau européen. L'intensité et la tension du courant alternatif varient à un rythme régulier, car leur production est engendrée par un mouvement régulier de va-et-vient des aimants devant une boucle de cuivre. C'est le type de courant qui est fabriqué dans les centrales grâce à la rotation de l'alternateur.
- ◆ **Le courant continu** est un courant électrique constant, qui circule en boucle (du pôle + au pôle -). Pour fabriquer du courant continu, soit on utilise un panneau photovoltaïque, une pile ou une batterie, soit on redresse du courant alternatif (comme le fait par exemple, la dynamo d'une bicyclette).

L'électricité est **un bien de consommation** auquel ses caractéristiques physiques confèrent une certaine spécificité :

- **L'électricité ne se stocke pas** en grande quantité. Il faut en permanence équilibrer la production avec la consommation, c'est-à-dire être en mesure de produire plus en cas de nécessité, mais aussi de produire moins. **Il est donc nécessaire de prévoir la consommation.**

- **L'électricité se propage à la vitesse de la lumière.** Le délai entre la « commande » et la « livraison » est quasi-nul.

- **Le système réagit en temps réel aux besoins des consommateurs.** C'est la somme des besoins des consommateurs qui détermine à chaque instant le niveau de production.

- **Le courant emprunte de lui-même le chemin « le plus facile »,** c'est-à-dire celui qui offre le moins de résistance à sa propagation (en passant par les éléments les plus conducteurs d'électricité).

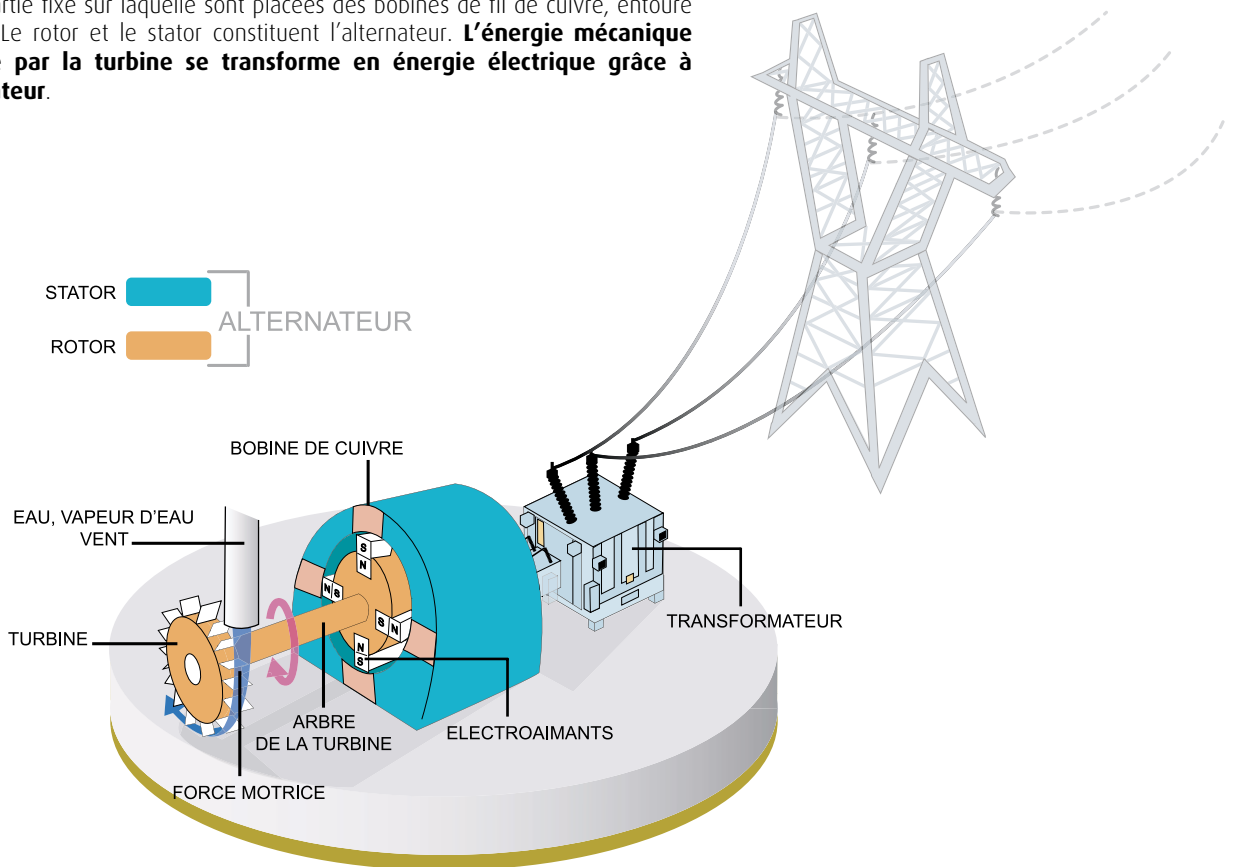
- **Une partie de l'électricité transportée se dissipe sous forme de chaleur :** ce sont les pertes par « effet Joule ». Plus la tension est élevée, moins il y a de pertes en ligne. **Le transport sur une longue distance gagne donc à être effectué au niveau de tension le plus élevé** (400 000 volts en France).

- Le niveau de tension de l'électricité est progressivement abaissé au moyen des postes de transformation avant d'arriver à son destinataire. La grande majorité de la consommation se fait en basse tension (230 ou 400 volts).



Comment l'électricité est-elle produite ?

A l'exception des centrales photovoltaïques, qui transforment directement l'énergie solaire en courant continu, **les centrales électriques** (thermiques à flamme, nucléaires, hydrauliques...) **produisent du courant alternatif** avec le même principe de fonctionnement. Une centrale produit ou utilise **une force motrice** (vapeur d'eau, vent, eau...), qui fait tourner l'arbre de la turbine, lequel entraîne **un rotor**, partie tournante circulaire composée d'électro-aimants. Le stator, partie fixe sur laquelle sont placées des bobines de fil de cuivre, entoure le rotor. Le rotor et le stator constituent l'alternateur. **L'énergie mécanique produite par la turbine se transforme en énergie électrique grâce à l'alternateur.**



LES CENTRALES ÉLECTRIQUES

Les centrales hydrauliques utilisent les chutes d'eau ou le débit des fleuves comme force motrice. Pour amener l'eau dans les turbines, un barrage est construit sur une rivière afin de constituer une réserve d'eau. Par la différence de hauteur, l'eau acquiert une force qui est canalisée jusqu'à la turbine.

Les centrales thermiques à flamme utilisent la chaleur résultant de la combustion de charbon, fioul, gaz, bois, biomasse, biogaz, déchets... Une chaudière chauffe l'eau sous pression. Cette dernière est transformée en vapeur, force motrice de la turbine.

Les centrales thermiques nucléaires fonctionnent grâce à la chaleur dégagée par la fission de l'atome d'uranium qui s'opère dans le cœur du réacteur. Cette chaleur produit de la vapeur dans un échangeur de chaleur. Cette vapeur sert ensuite à entraîner la turbine.

Les éoliennes captent l'énergie du vent qui fait tourner les pales, comme l'eau du barrage fait tourner la turbine.

Les centrales solaires concentrent la chaleur du soleil dans des tours ou des collecteurs paraboliques.

Les centrales géothermiques exploitent la chaleur du sous-sol terrestre.

Dans les deux derniers cas, cette chaleur produit de la vapeur, force motrice de la turbine.

La gestion des transits dans les réseaux électriques

La circulation de l'électricité se fait par l'intermédiaire de conducteurs, c'est-à-dire de matériaux qui laissent passer le courant (essentiellement les métaux – fils électriques : cuivre, aluminium...).

L'intensité maximale admissible dans une ligne aérienne

L'intensité électrique qui peut transiter dans une ligne aérienne est limitée pour garantir la sécurité des personnes et des biens au voisinage de la ligne. L'arrêté interministériel du 17 mai 2001, dit « arrêté technique », régit les conditions techniques auxquelles doivent satisfaire les ouvrages de transport et de distribution d'électricité. En particulier, pour que les lignes aériennes du réseau de transport ne constituent pas un danger électrique, il faut qu'en tout lieu l'air assure l'isolement des câbles conducteurs par rapport aux personnes et aux obstacles environnants (bâtiments, maisons, arbres, voies ferrées, cours d'eau...). L'arrêté technique définit les distances minimales de sécurité électrique à respecter pour obtenir cet isolement aussi bien en surplomb qu'en voisinage latéral. RTE conçoit ses lignes pour que ces distances soient respectées jusqu'à une certaine intensité transitant dans la ligne (quand ils sont parcourus par un courant, les conducteurs s'échauffent par « effet joule » et s'allongent légèrement donc se rapprochent des obstacles). Cette intensité maximale est différente suivant la saison. Par exemple en été, où la température extérieure est plus élevée, le conducteur s'allonge naturellement un peu plus, donc peut transporter moins d'énergie.

Les transformateurs ont également une intensité maximale admissible, la limitation étant déterminée par l'échauffement interne du transformateur (au-delà d'une certaine valeur, l'échauffement engendre un vieillissement prématuré du transformateur).

Prévoir les transits pour s'assurer que les capacités de transport des ouvrages du réseau sont suffisantes

Comme la construction d'une ligne du réseau de transport, d'un poste électrique ou d'une centrale de production dure plusieurs années (en intégrant les phases de concertation et de procédures administratives), les décisions de réalisation doivent être anticipées par rapport aux besoins. Pour cela, RTE prévoit les niveaux de consommation et la production disponible en chaque point du réseau.

Grâce à des logiciels de calcul des transits dans les réseaux électriques, les prévisions de consommation sont traduites en valeur de transit dans chaque ligne et chaque transformateur du réseau. Pour planifier le développement du réseau électrique –comme pour gérer le système électrique au quotidien–, RTE applique la « règle du N-1 » selon laquelle, schématiquement, le réseau doit supporter le transit dans toutes les situations de panne d'un de ses éléments (ligne,

Les surcharges en cascade

Il peut arriver que l'intensité transitant dans une ligne dépasse son intensité maximale admissible, dans certaines conditions exceptionnelles (niveau de consommation non pris en compte dans les études prévisionnelles de RTE, par exemple lors de période de grand froid). Ce phénomène peut présenter un danger pour les personnes, car la distance de sécurité peut ne plus être respectée. Le matériel risque en outre d'être endommagé. Un dispositif de protection particulier, appelé « protection de surcharge », entre alors en

action. En quelques minutes ou quelques secondes suivant l'ampleur du dépassement d'intensité, il met la ligne hors tension en actionnant les disjoncteurs situés à chaque extrémité.

Le transit supporté auparavant par cette ligne va alors se reporter dans d'autres chemins électriques en raison du maillage du réseau de transport, risquant de provoquer de nouvelles surcharges. C'est alors l'amorce d'un phénomène de cascade (c'est-à-dire d'une succession de mises hors tension des lignes), qui peut conduire à la mise hors tension de vastes zones du réseau.

C'est ce phénomène qui s'est produit aux frontières italiennes le 28 septembre 2003. L'Italie était à ce moment fortement importatrice d'électricité, donc les lignes transfrontalières étaient très chargées. Un court-circuit sur une ligne proche de l'Italie a provoqué un report du transit de cet ouvrage sur les autres lignes, qui sont entrées en surcharge. Le système de protection de ces lignes les a mises hors tension. La production italienne ne pouvant faire face à la consommation, la tension et la fréquence se sont écroulées, menant à la panne généralisée.

« RTE construit et exploite ses lignes pour que les distances de sécurité soient respectées à tout instant »

transformateur...) sans que l'intensité maximale admissible soit dépassée. En effet, en cas de panne, le transit se répartit dans les autres chemins électriques, car le réseau de transport est maillé. Si la capacité d'un ouvrage du réseau n'est pas suffisante, RTE propose aux pouvoirs publics un renforcement du réseau, qui peut aller de l'adaptation des ouvrages existants à la création de nouveaux ouvrages, en fonction du besoin auquel il faut répondre.

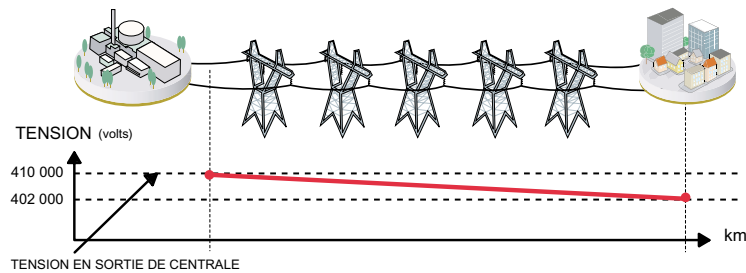
Dans le cas de l'insertion du groupe de production Flamanville 3 dans le réseau électrique, on constate dans certaines situations actuelles du parc de production, l'apparition de risques de surcharge, notamment lorsque des flux traversent la zone d'étude du nord-est vers le sud-ouest.

Le réglage de la tension

La gestion du réseau électrique ne consiste pas seulement à faire en sorte que les transits soient inférieurs aux capacités de transport de chaque ouvrage du réseau. Il faut également surveiller plusieurs paramètres techniques, dont **le niveau de tension** : la tension électrique doit rester dans une plage autorisée en tout point du réseau, dans toutes les situations de production et de consommation prévisibles. En effet, la tension peut localement être dégradée, par exemple les jours de forte consommation (dans ce cas, les transits à travers les lignes du réseau RTE sont importants, ce qui provoque une chute de tension dans ces lignes).

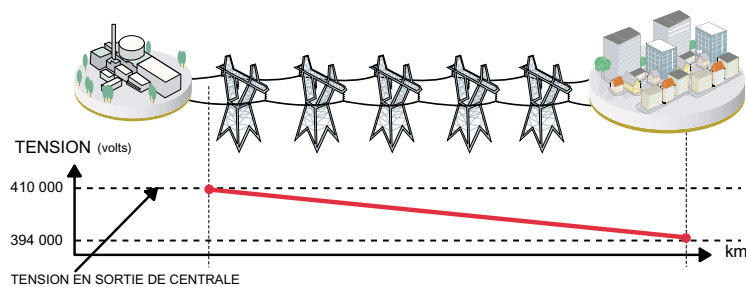
La chute de tension dans les lignes

Lorsque le transit dans une ligne électrique est assez important, la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de la tension. La tension est alors plus basse en bout de ligne qu'en son origine et plus la ligne est chargée en transit de puissance, plus la chute de tension sera importante.



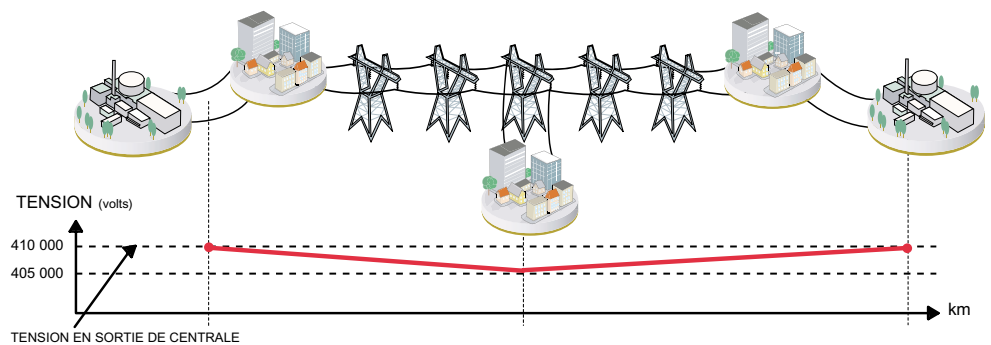
1. Cas d'une consommation alimentée par une ligne depuis une centrale

Si la consommation double, la chute de tension double.



2. Cas d'une forte consommation alimentée par une ligne depuis une centrale

Un réseau dans lequel la consommation est éloignée de la production, présentera un profil de tension différent de celui d'un réseau dans lequel production et consommation sont uniformément réparties. Chaque centrale impose la tension à sa sortie, et la tension évolue dans le réseau en fonction de la consommation alimentée.



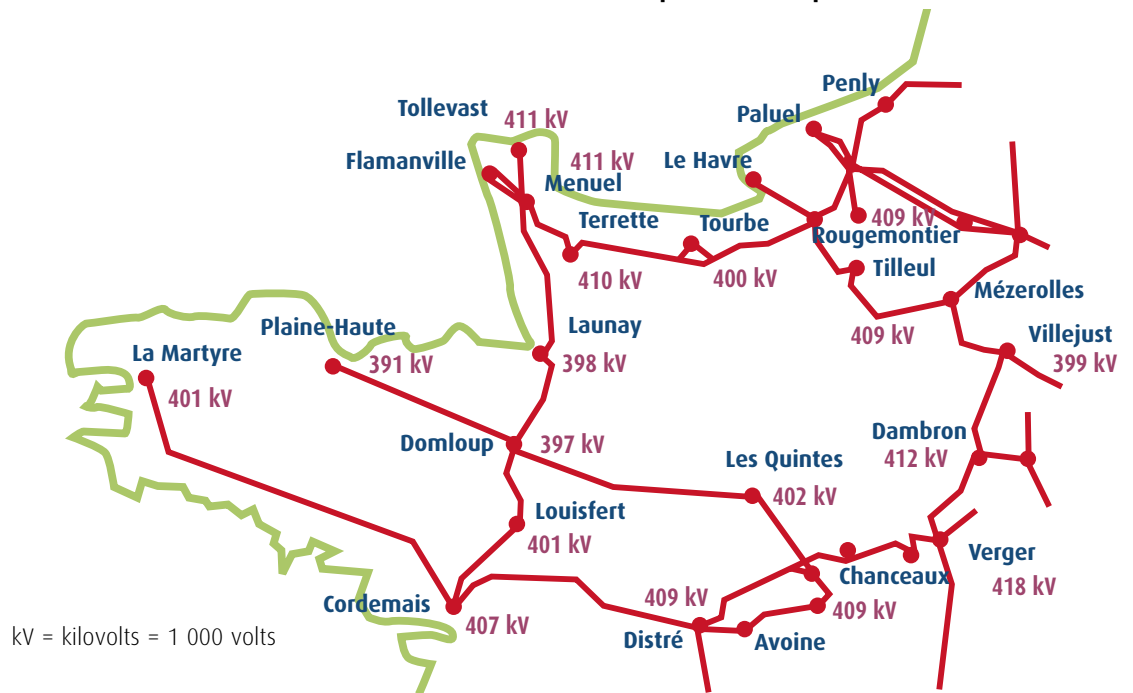
3. Cas d'une consommation répartie avec plusieurs centrales

C'est pourquoi dans le réseau maillé à 400 000 volts, la tension est différente suivant l'endroit où l'on se trouve. A la pointe de consommation, la tension est forte aux nœuds du réseau où les centrales débitent, et relativement basse aux points de consommation éloignés des centrales (pointe de la Bretagne, région parisienne), ainsi que le montre la carte, qui est un extrait d'un plan de tension pour le nord-ouest de la France, à la consommation de pointe d'hiver.

Les schémas ci-dessus sont valables pour un instant donné, à un niveau de consommation donné. Lorsque la consommation varie au cours du temps, la tension évolue, baissant lorsque la consommation augmente, remontant lorsque la consommation diminue.

Le fait que la tension ne soit pas identique en tout point du réseau est normal. Cette différence est compensée par des réglages de tension réalisés dans les postes de transformation. Cela permet de garantir que **la tension reste dans la plage admissible en tout point** de livraison (par exemple pour un particulier alimenté en 230 volts, dans la limite de + 6 % ou - 10 %). Afin de maintenir la tension en bout de ligne, RTE peut installer des moyens dits « de compensation » (batteries de condensateurs ou des dispositifs électroniques appelés CSPR-Compensateurs Statiques de Puissance Réactive), qui limitent la chute de tension.

Extrait du plan de tension pour le nord-ouest de la France



Le « plan de tension »

Pour que la tension reste à chaque instant dans une plage acceptable pour les matériels, **des dispositifs de réglage automatique** de la tension sont répartis sur le réseau de transport. Ils agissent principalement sur les groupes de production, qui peuvent réguler la tension au point du réseau où ils sont raccordés. Ces dispositifs sont importants pour la sûreté de fonctionnement du système électrique, car **ils évitent l'apparition de phénomènes tels que les écroulements de tension**. Pour fournir une tension supérieure à la tension minimale autorisée en tout point du réseau, même en bout de ligne, les groupes de production élèvent la tension à un niveau supérieur à la tension nominale. **Le plan de tension** sur le réseau à 400 000 volts est défini en temps réel par RTE, qui **fixe les tensions à maintenir** en un certain nombre de points dits « points pilotes », de manière à éviter les écroulements de tension.

L'écroulement de tension

Lorsque la tension baisse, les dispositifs de régulation entrent automatiquement en action et agissent sur les groupes de production pour relever la tension. Ces dispositifs ont une action limitée, qui peut être insuffisante en cas d'avarie de groupes de production.

Par exemple, le 12 janvier 1987, plusieurs avaries dans des groupes de production de l'ouest de la France, un jour où la consommation était importante, ont conduit à un écroulement de tension dans l'ouest de la France. A Brest, point le plus affecté, la tension du réseau à 400 000 volts n'était plus que de 200 000 volts. Lorsque la tension commence à baisser dans une zone, les zones voisines sont affectées : leur tension baisse également. Lorsque les dispositifs de régulation arrivent en limite de leur efficacité, plus rien ne peut enrayer la chute de la tension et la propagation de l'incident, mis à part le délestage, c'est-à-dire la coupure maîtrisée d'une partie de la consommation. C'est l'effet « château de carte ». En quelques minutes, une zone très vaste peut être affectée. La remise en tension du réseau prend en général plusieurs heures.

Le réglage de la fréquence

Les centrales doivent à tout instant **produire la quantité d'électricité nécessaire à l'alimentation de la consommation**. Pour répondre à cet impératif, les centrales de France et d'Europe sont interconnectées grâce au maillage du réseau de transport, et peuvent se secourir mutuellement en cas de panne. Pour que le réseau interconnecté fonctionne, il existe **une obligation commune** à toutes les centrales : leurs alternateurs doivent tourner à la même vitesse électrique, afin de **produire une tension de fréquence uniforme** dans tout le réseau européen. C'est ce qu'on appelle **le synchronisme** des alternateurs.

Qu'est-ce que la fréquence?

La fréquence correspond au nombre de cycles que fait le courant alternatif en une seconde (voir chapitre 2). Pour un alternateur, elle correspond au nombre de tours que fait l'arbre de la turbine en une seconde, multiplié par le nombre d'électro-aimants placés dans le rotor.

A la différence de la tension, qui est un paramètre local (la tension est différente en tout point du réseau, elle dépend du courant qui circule dans les lignes au voisinage du point considéré), **la fréquence est homogène dans tout le réseau électrique** dès lors que la production et la consommation sont en équilibre.

Le maintien de la fréquence

La fréquence doit être maintenue autour de la valeur nominale de **50 Hz**, quelles que soient les variations de consommation ou de production. En effet, d'une part, une fréquence évoluant sans cesse rendrait l'électricité inutilisable pour de multiples usages, d'autre part, la plupart des composants du système électrique sont conçus pour fonctionner dans une plage de fréquence donnée, en dehors de laquelle des dysfonctionnements graves de matériels peuvent apparaître.

Est-ce que la fréquence peut varier?

La fréquence varie en permanence très légèrement en fonction de la consommation d'électricité et des événements affectant la production. Les écarts de fréquence sont mesurés en millièmes de Hertz. Les systèmes de régulation des centrales corrigent ces variations de fréquence.

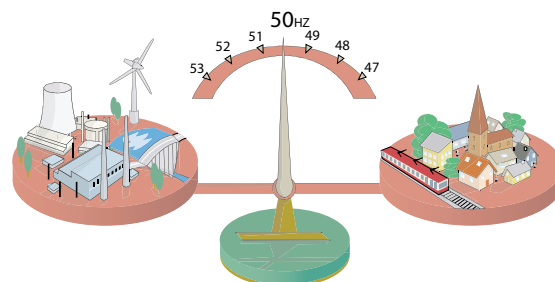
Quels sont les différents types de variations de fréquence?

On distingue :

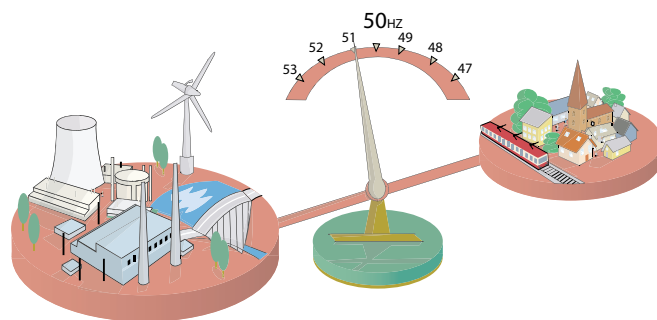
- les petites variations globales et aléatoires autour de 50 Hz dues aux évolutions continues de la consommation ;
- les variations globales de fréquence, qui peuvent être provoquées par des variations brutales de production (arrêt inopiné d'une centrale ou avarie sur la ligne de raccordement d'un groupe) ;
- les fortes variations locales de fréquence qui surviennent lors d'incidents de type court-circuit.

POURQUOI 50 Hz ?

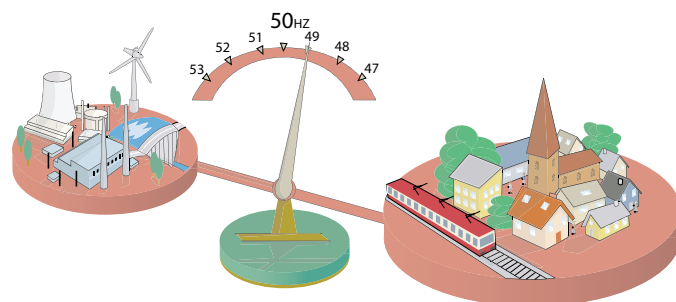
Le choix de la fréquence a été fait il y a plus de 100 ans. Cette fréquence correspond à **un optimum technico-économique**. Une fréquence plus élevée conduirait à des coûts de transport supérieurs et une fréquence trop faible risquerait d'être visible sur les ampoules, que l'œil humain verrait scintiller.



Le maintien de la fréquence



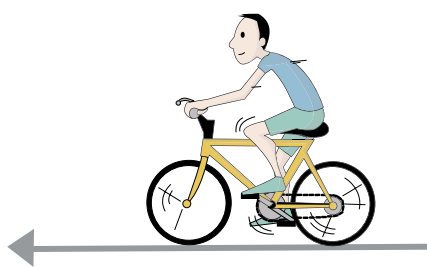
Les variations de fréquence



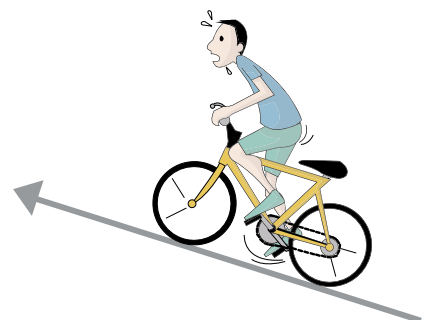
Que se passe-t-il en cas de variations de fréquence ?

Prenons l'exemple de variations de fréquence liées à des variations de consommation. **Lorsque la consommation augmente, la turbine de l'alternateur ralentit.** Cette variation de fréquence n'a **pas d'effet sur le consommateur** car elle dure très peu de temps et est très légère.

Pour mieux comprendre ce phénomène, nous prendrons l'exemple d'un cycliste (que nous appelons aussi « force motrice ») qui pédale en fournissant un effort constant, sur une route (que nous appelons aussi « force de résistance »). Pour cette illustration, nous supposons que la bicyclette n'a pas de dérailleur. **Ce cycliste représente la centrale qui doit maintenir sa fréquence.**



Dans la situation initiale, **la route est plate**, le cycliste pédale à effort constant, sa vitesse est constante. Dans une centrale, cela correspond à **une consommation exactement égale à la production** (situation d'équilibre). L'arbre de la turbine conserve son rythme. La fréquence est donc maintenue.



Si **la route monte** la force de résistance augmente. Si le cycliste ne pédale pas plus fort, il va ralentir. Dans une centrale, cela revient à dire que **si la consommation augmente** (la force de résistance augmente), **l'arbre de la turbine va ralentir**, donc **la fréquence** du courant produit **va baisser**.



Si **la route descend**, le cycliste va augmenter sa vitesse, entraîné par la descente, car la force de résistance qu'il rencontre diminue. Dans une centrale, cela revient à dire que **si la consommation baisse** (la force de résistance diminue), **l'arbre de la turbine va accélérer**, donc la fréquence du courant produit **va augmenter**.

Dans cet exemple, les variations sont faibles. Elles sont uniquement dues à des variations de consommation sur une courte durée. La fréquence peut être rétablie à 50 Hz, grâce aux dispositifs de régulation installés dans les centrales. Des variations brutales de production ont le même effet.

Ces variations de fréquence sont maîtrisées dans un cas comme dans l'autre et ne portent pas à conséquence, sauf dans des cas de déséquilibre production / consommation exceptionnel. On peut alors assister à un écroulement de fréquence du réseau électrique.

En revanche, dans le cas des courts-circuits, la fréquence des centrales proches du court-circuit est fortement perturbée.

Dans certains cas, cela peut conduire à une rupture de synchronisme (voir chapitre 4).

L'écroulement de fréquence

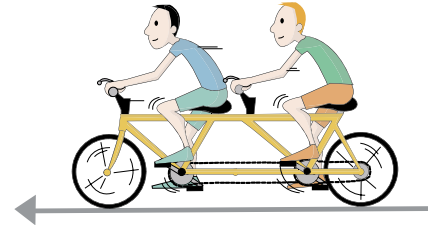
Lorsqu'un réseau est dans une situation tendue pour l'équilibre production / consommation, parce que la consommation atteint un niveau exceptionnel, ou à cause d'un parc de production en partie indisponible, une baisse de fréquence peut se produire. **En dessous d'un certain seuil de fréquence, les groupes de production se séparent du réseau pour éviter d'être endommagés.** La fréquence chute alors un peu plus, et de nouveaux groupes se séparent du réseau, accélérant le déséquilibre entre production et consommation, donc la chute de fréquence : **c'est l'écroulement de fréquence.** Ce phénomène est très rapide : on constate une baisse de plusieurs Hertz par seconde. L'ensemble du réseau interconnecté se trouve alors dans une situation très critique. Le seul moyen de faire remonter la fréquence est alors de diminuer rapidement la consommation en ayant recours à du **délestage**, c'est-à-dire la coupure maîtrisée d'une partie de la consommation.

Le synchronisme et la rupture de synchronisme.

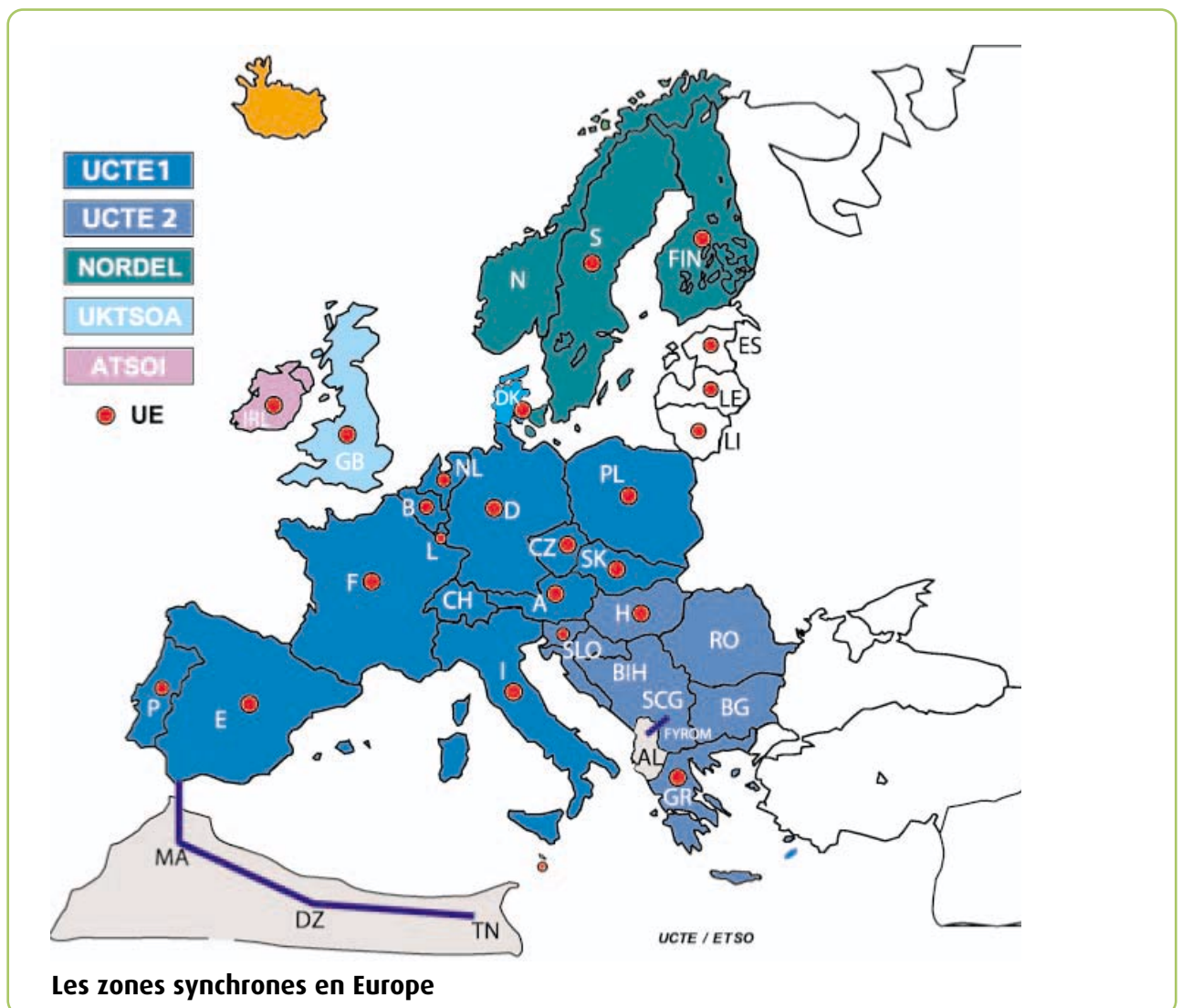
Qu'est-ce que le synchronisme ?

C'est le fonctionnement à la même fréquence de toutes les centrales interconnectées autour de 50 Hz en Europe (voir carte). Pour comprendre, reprenons l'analogie avec le cycliste mais, cette fois, avec l'exemple d'un tandem pour illustrer la problématique du maintien du synchronisme.

Pour que le tandem roule normalement, il faut que les deux cyclistes pédalent à la même allure. Dans un réseau électrique, cela revient à dire que **toutes les centrales connectées doivent fonctionner à la même fréquence. C'est le synchronisme.**



NB : Cette analogie entre le fonctionnement des centrales de production interconnectées et celui d'un tandem comporte des limites ; en particulier elle n'est pas strictement exacte au plan des lois physiques. Elle a donc été utilisée dans un but illustratif.



Les pays d'Europe se sont réunis en **zones synchrones**, c'est-à-dire où la fréquence du réseau est identique. La tension alternative a la même fréquence en Bulgarie, au Danemark, au Portugal, en France et dans le Maghreb. Chacun de ces pays peut donc secourir instantanément un autre pays en cas d'incident (panne de centrale...), et au quotidien partager les moyens de production disponibles. Cela rend le réseau plus robuste et l'électricité moins chère.

Qu'est-ce que la rupture de synchronisme ?

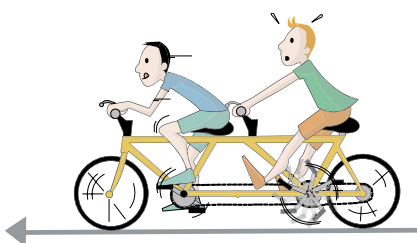
C'est le fait qu'une centrale ou un groupe de centrales **fonctionne durablement** (quelques secondes) à une **fréquence différente des autres centrales** interconnectées sur le même réseau. Cela se produit dans certaines situations, comme par exemple à la **suite d'un court-circuit** (voir encadré).

Ce dernier provoque des perturbations violentes, ressenties plus ou moins fortement par les alternateurs des centrales électriques en

fonction de leur éloignement du lieu du court-circuit. En général, les perturbations sont rapidement éliminées par les dispositifs de protection installés sur le réseau. Mais **pour les centrales situées à proximité** du lieu du court-circuit, ce dernier induit une **accélération temporaire de la vitesse** de rotation des **alternateurs** et donc de la fréquence locale du réseau.

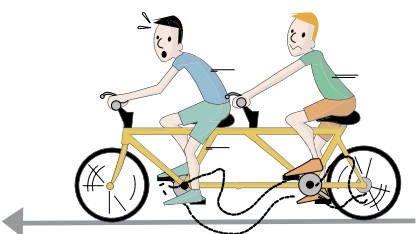
En général, les alternateurs qui subissent des

oscillations se désynchronisent légèrement du reste du réseau avant de se re-synchroniser sur la fréquence générale du réseau. Si le lien électrique (lignes du réseau) entre le groupe subissant la perturbation et le reste du réseau n'est pas assez puissant et si, malgré l'action des dispositifs de régulation de la centrale, les alternateurs ne parviennent pas à se recaler sur la fréquence du réseau général, alors il y a rupture de synchronisme.



Dans l'exemple du tandem, si l'un des deux cyclistes se met à accélérer, le second est entraîné et doit accélérer à son tour pour que le tandem roule normalement.

Mais, si l'un des deux cyclistes freine alors que l'autre tente de pédaler, la chaîne du vélo risque de rompre.



Dans un réseau électrique, cela revient à dire que si l'une des centrales interconnectées accélère ou ralentit sa fréquence de manière importante, elle dérègle l'équilibre du réseau. C'est la perte de synchronisme.

10 000 À 12 000 COURTS-CIRCUITS PAR AN

Les ouvrages du réseau de transport subissent de l'ordre de **10 à 12 000 courts-circuits par an**, dus très majoritairement aux conditions météorologiques : environ **60 % pour la foudre** et un peu plus de 20 % pour le givre, la neige collante, la pluie, le vent, la pollution saline. Les avaries de matériels interviennent à hauteur de 2 %, le reste étant dû à des causes diverses (contacts avec la végétation et les animaux, incidents dont l'origine est chez les utilisateurs, actes de malveillance...).

Quelles sont les conséquences de la rupture de synchronisme ?

La **tension** observée en certains points du réseau **se met à osciller** (clignotement des ampoules chez le consommateur, vibrations et échauffements des moteurs industriels et dans les appareils domestiques pouvant aller jusqu'à l'arrêt...). Dans les centrales, des contraintes mécaniques apparaissent sur les matériels, notamment des contraintes

vibratoires et de torsion des arbres des machines, qui peuvent détériorer les matériels.

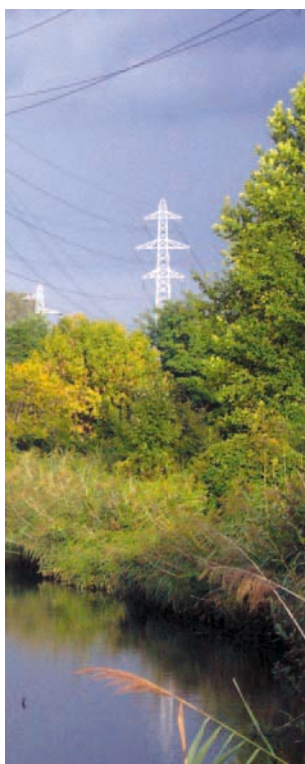
Si le phénomène se prolonge, des automatismes installés sur le réseau réagissent et découpent le réseau suivant des zones prédéfinies de manière à isoler la zone en rupture de synchronisme. Cela évite la propagation du phénomène ainsi que la

détérioration des groupes turboalternateurs des centrales.

Si le déséquilibre entre production et consommation dans la zone découpée est trop important, il y a un risque que les groupes de production se déconnectent du réseau, ce qui entraîne la **mise hors tension de la zone** (« blackout » localisé de la zone).

Plusieurs grands incidents engendrés par des courts-circuits sur le réseau de transport, en France et à l'étranger, ont eu pour effet des pertes de synchronisme de groupes de production, avec des conséquences importantes en termes de clientèle coupée. On peut notamment citer :

28 octobre 1981	Normandie	<p>Court-circuit au poste électrique de Rougemontier, à l'ouest de Rouen.</p> <ul style="list-style-type: none"> ➔ Perte de synchronisme de la centrale thermique à flamme du Havre. ➔ Mise hors tension totale de la région (coupure de 1 470 MW).
17 février 1985	Vallée du Rhône	<p>Courts-circuits sur des lignes à 400 000 volts de la vallée du Rhône.</p> <ul style="list-style-type: none"> ➔ Perte de synchronisme des groupes nucléaires de la zone. ➔ Délestages pour sauvegarder la fréquence du réseau européen, dont 250 MW en Belgique et 300 MW en Italie.
18 avril 1988	Canada	<p>Série de courts-circuits dans un poste électrique.</p> <ul style="list-style-type: none"> ➔ Perte de synchronisme de la centrale de Churchill Falls. ➔ Effondrement du système électrique du Québec : seuls 250 MW sur 20 000 MW sont restés alimentés.



Qu'est-ce qu'un lien synchronisant ?

Le lien synchronisant est **l'ensemble des mailles du réseau qui relient entre eux les alternateurs** des centrales électriques en leur permettant de rester synchrones. **Le lien synchronisant** est assimilable à **un élastique**. Plus l'élastique est rigide, meilleur est le lien synchronisant.

Pour comprendre la notion de lien synchronisant, nous pouvons reprendre l'analogie du tandem, et remplaçons la chaîne par un élastique. Si on demande aux deux cyclistes de pédaler à la même vitesse, ils auront beaucoup de mal à y parvenir si l'élastique est lâche. En ajoutant un deuxième élastique sur le premier : ils pourront plus facilement pédaler à la même vitesse.

Dans un réseau électrique, le lien synchronisant d'une centrale dépend de la longueur et du nombre des lignes électriques reliant cette centrale aux autres. Plus cette centrale est proche des autres, plus les lignes sont courtes, meilleur est le lien synchronisant. A l'inverse, plus cette centrale est éloignée des autres, plus les lignes sont longues, moins le lien synchronisant est bon.

Dans ce deuxième cas, on peut y remédier en augmentant le nombre de lignes en parallèle, ce qui améliore le lien synchronisant. C'est comme si l'on rapprochait la centrale du reste du réseau. Enfin, plus la puissance transportée est importante, plus le lien synchronisant doit être fort pour éviter la perte du synchronisme.

Le lien synchronisant peut être amélioré légèrement en modifiant les lignes existantes, et plus fortement en construisant des lignes supplémentaires pour augmenter le maillage du réseau. L'utilisation de technologies comme les condensateurs en série ont également un impact positif sur le lien synchronisant. Toutes ces possibilités sont analysées au chapitre 6.

Dans le cas de l'insertion du groupe de production Flamanville 3 dans le réseau électrique, nous allons voir pourquoi il est nécessaire de construire une nouvelle ligne à 400 000 volts pour acheminer l'énergie produite par Flamanville 3 et surtout pour éviter les pertes de synchronisme en cas de court-circuit dans la zone.

Pour en savoir plus sur la sûreté de fonctionnement du système électrique, on pourra se référer aux documents « Mémento de la sûreté du système électrique » et au « Bilan annuel de la sûreté du système électrique » présentés dans la bibliographie, publiés par RTE et téléchargeables sur www.rte-france.com.