



CHAPITRE

6



AUTRES TECHNIQUES ÉTUDIÉES



AUTRES TECHNIQUES ÉTUDIÉES



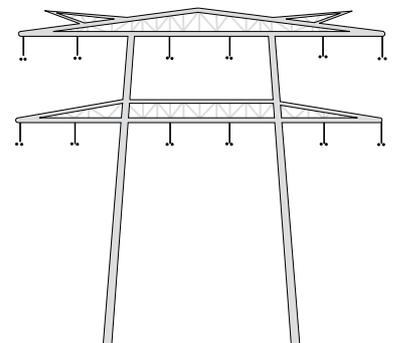
Afin de choisir la meilleure solution du point de vue de l'efficacité technique, du coût et de l'impact environnemental, RTE a étudié plusieurs actions possibles sur le réseau, autres que la construction d'une ligne à 400 000 volts, dans le but d'améliorer le lien synchronisant entre le Nord Cotentin et le reste du réseau, et de résoudre les autres problèmes techniques présentés dans les chapitres précédents.

Certaines technologies décrites dans ce chapitre sont utilisées pour résoudre d'autres types de problèmes que ceux posés par l'insertion du groupe de production Flamanville 3 dans le réseau de transport. Elles sont évoquées pour répondre à la question de leur éventuelle efficacité dans le cas présent.

ACTIONS TECHNIQUEMENT EFFICACES, MAIS D'UN COÛT PROHIBITIF

Étude n°1 : construction d'une ligne quadruple circuit

- ◆ **En quoi cela consiste ?** Il s'agirait de reconstruire la ligne existante, **en multipliant par deux le nombre de câbles conducteurs** supportés par les pylônes. La ligne actuelle, dite « double circuit » car elle supporte deux ensembles de trois câbles conducteurs, serait remplacée par une ligne « quadruple circuit », supportant quatre ensembles de trois câbles conducteurs.
- ◆ **Les utilisations habituelles :** Cette technique n'est pas habituelle : il **n'existe pas en France de ligne quadruple au niveau de tension de 400 000 volts**, car les contraintes d'exploitation sont importantes (nécessité de mettre les quatre circuits hors tension pour certaines interventions de maintenance).
- ◆ **Avantages :** Cette action est **une solution efficace du point de vue technique** (pour le synchronisme, le dépassement de l'intensité maximale admissible, et l'écroulement de tension), qui pourrait utiliser les tracés de ligne existants. De plus, elle permet de n'avoir qu'une seule file de pylônes en fin de travaux.
- ◆ **Inconvénients :** Cette action présente de nombreux inconvénients :
 - Une **emprise au sol très importante** : pour une hauteur à peu près identique à celle des pylônes double circuit, les pylônes quadruple circuit sont presque deux fois plus larges.
 - Son **coût très élevé**.
 - Du point de vue de **l'exploitation du réseau** (entretien, travaux), cette technique soulève des **difficultés** car certaines opérations nécessitent la mise hors tension des quatre circuits.
- ◆ **Coût :** Le coût de cette ligne quadruple serait de **2,5 fois le coût** de construction **d'une nouvelle ligne double**.
- ◆ **Efficacité :** En terme de synchronisme, l'efficacité est bonne (équivalente à la construction d'une ligne supplémentaire).



pylône quadruple circuit



pylône double circuit

Étude n°2 : construction d'une liaison souterraine

◆ **En quoi cela consiste ?** Il s'agit de construire un lien synchronisant en liaison souterraine à 400 000 volts. Deux technologies sont disponibles : le câble à isolation synthétique (CIS) et le câble à isolation gazeuse (CIG). La technologie du câble supraconducteur est beaucoup moins avancée, elle est aujourd'hui au stade du prototype.

Une **liaison souterraine** en technologie CIS **nécessite quatre tricâbles** (c'est-à-dire quatre ensembles de trois câbles conducteurs) pour fournir une capacité de transit égale à celle de la ligne aérienne à double circuit nécessaire à l'insertion du groupe de production Flamanville 3 dans le réseau électrique.

◆ **Les utilisations habituelles :** Les liaisons souterraines sont utilisées pour les niveaux de tension inférieurs (voir chapitre 9). En 400 000 volts, il existe quelques liaisons souterraines de faible longueur, principalement pour l'alimentation de grandes villes étrangères (Berlin, Madrid, Londres...). A noter que la question ne se pose pas pour les grandes villes françaises, y compris Paris, qui sont desservies par des liaisons souterraines à 225 000 volts.

◆ **Avantages :** Cette technologie est efficace pour le synchronisme, le transit et la tenue de tension. Elle présente un **impact visuel moindre** que la ligne aérienne et une **moindre sensibilité aux variations climatiques**. Les pertes par « effet Joule » sont plus faibles dans la ligne souterraine, d'un facteur 2 ou 3 environ.

◆ **Inconvénients :** Le principal inconvénient de la liaison souterraine est son **coût extrêmement élevé** (voir ci-dessous). Il faut également mentionner :

- La présence de courants induits, dits « courants capacitifs », qui saturent le transit dans les circuits CIS et sont inutilisables pour l'alimentation des consommateurs. Pour les éliminer, des stations de compensation sont installées tous les 20 à 25 km environ.

- Une difficulté d'utilisation dans le réseau à 400 000 volts maillé, formé de liaisons aériennes. La liaison souterraine présente une **impédance trois fois moindre** que celle d'une ligne aérienne (l'impédance est l'équivalent pour le courant alternatif de la résistance pour le courant continu). C'est donc un chemin préférentiel pour le transit de puissance. La ligne Cotentin – Maine étant insérée dans un réseau maillé, les cheminements de puissance dans le réseau seraient bouleversés et le dimensionnement des ouvrages existants pourrait être remis en cause.

- Un impact environnemental non négligeable. Les travaux de construction d'une liaison souterraine à 400 000 volts nécessitent, pour l'ouverture de plusieurs tranchées et la circulation des engins, une emprise d'environ 15 m de large. Ces travaux ont un impact important sur l'environnement (faune, flore, sol et sous-sol). **Après la mise en service, le terrain au-dessus de l'ouvrage doit être laissé vierge de toute plantation d'arbre et d'arbuste et de toute habitation.**

- Du point de vue de la maintenance du réseau, **les avaries** sur les câbles souterrains **sont beaucoup plus longues à réparer** que sur les lignes aériennes et induisent des impacts dus aux travaux de terrassement.

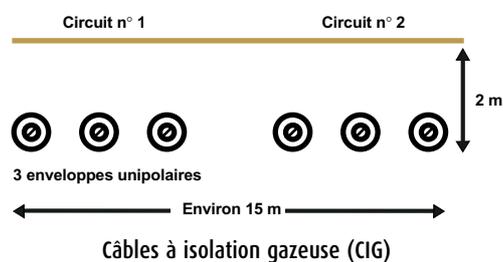
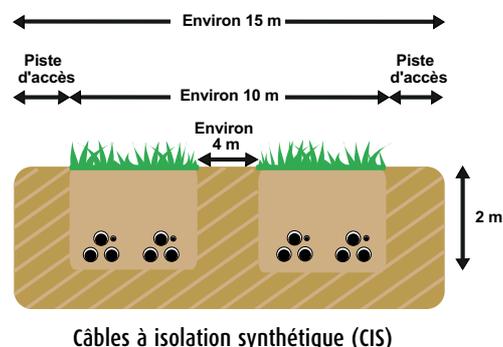
◆ **Coût :** Au niveau de tension de 400 000 volts, le coût d'investissement nécessaire à la construction d'une liaison souterraine est d'environ **9 fois le coût de la ligne aérienne** (avec les technologies les plus modernes actuellement disponibles).

Pour le projet Cotentin – Maine, cela conduirait à un surcoût d'investissement de l'ordre de 1 milliard d'euros.

Ce surcoût représente l'équivalent du double du montant annuel des investissements actuels de RTE. Il nuirait donc très fortement aux objectifs de productivité que se fixe RTE pour faire baisser le coût du transport d'électricité au bénéfice de l'ensemble des utilisateurs du réseau.

◆ **Efficacité :** L'efficacité de cette technique est théoriquement bonne pour le maintien du synchronisme. Toutefois, la présence d'une liaison souterraine au sein d'un réseau composé de liaisons aériennes produit des modifications des transits et du plan de tension qui impliquent l'installation de moyens de compensation. Il convient de noter qu'**aucun ouvrage souterrain d'une telle longueur n'existe aujourd'hui dans le monde.**

Câbles souterrains équivalents



	Ligne souterraine	Ligne aérienne
Études	0,1 à 0,2 M€/km	0,1 M€/km
Fournitures	4,8 à 5,4 M€/km	0,3 M€/km
Travaux	2,1 à 2,4 M€/km	0,4 M€/km
Total	7,1 à 7,9 M€/km	0,83 M€/km



ACTIONS PALLIATIVES

POSANT DES PROBLÈMES RÉDHIBITOIRES

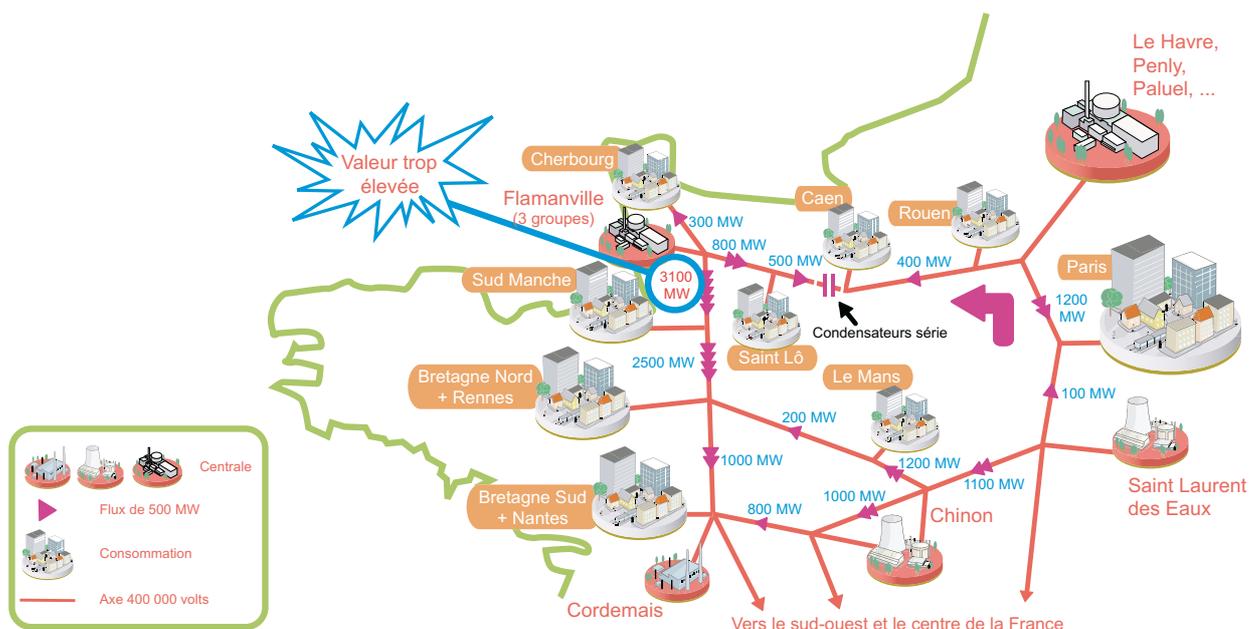
Étude n°3 : installation de condensateurs en série

- ◆ **En quoi cela consiste ?** Les condensateurs en série sont un **dispositif agissant directement ou localement sur le lien synchronisant** entre deux zones. Ils ont un effet comparable à un « raccourcissement » de la ligne, dont ils compensent une partie de l'impédance.
- ◆ **Les utilisations habituelles :** Les condensateurs en série **sont utilisés à l'étranger** dans le cas de sites de production éloignés des sites de consommation. Au Canada, aux États-Unis et au Brésil, des condensateurs en série ont été placés pour relier des centrales de production très éloignées afin de limiter les risques de perte de synchronisme. **Ces réseaux sont dits « en antenne »**, c'est-à-dire que la centrale est reliée au reste du réseau par un axe électrique unique, long de plusieurs centaines de kilomètres.
- ◆ **Avantages :** Cette technologie présenterait deux avantages :
 - elle a un **coût environ 4 à 5 fois moins important** que la création d'une ligne supplémentaire
 - elle a un **impact limité sur l'environnement** par rapport à la ligne supplémentaire, car les installations seraient construites dans l'enceinte de postes déjà existants
- ◆ **Inconvénients :** Cette technique présente plusieurs types d'inconvénients, dont deux obstacles majeurs à son utilisation dans le cas de Flamanville :

1. Le dépassement de l'intensité maximale admissible : en « diminuant la longueur » des lignes issues de Manuel vers l'est, on modifie les transits provenant du nord-est de la zone. Ces transits vont préférer s'écouler en direction de Caen plutôt que vers Paris, car les lignes apparaîtront plus courtes. Cela « poussera » les flux de puissance issus de Flamanville dans l'axe sud Manuel – Domloup (voir schéma ci-dessous). Les problèmes de transit sur l'axe sud ne seront donc pas résolus.

2. La faisabilité n'est pas assurée pour le cas de Flamanville, car les interactions entre les condensateurs en série, les alternateurs des groupes de production de Flamanville et le réseau de transport ne sont pas maîtrisées. Ces interactions peuvent se traduire par des résonances dans certaines configurations de réseau, qui endommageraient les groupes turbo-alternateurs de Flamanville.

Enfin, cette technique présente un autre inconvénient. Comme le réseau n'est pas renforcé, en cas d'avarie sur une des lignes ou sur les condensateurs série, on se retrouve dans une situation inacceptable où les trois groupes de production de Flamanville sont raccordés au réseau par une seule ligne. **Le réseau est donc moins robuste face à une avarie.**



Transits dans le nord-ouest de la France, situation de flux accentué du nord au sud avec installation de condensateurs série

◆ **Coût** : Estimé à **50 millions d'euros environ**.

◆ **Efficacité** : Ce système est théoriquement efficace pour améliorer le lien synchronisant entre le Nord Cotentin et le reste du réseau. Toutefois, **la faisabilité de ce système n'est pas assurée**, eu égard notamment à l'impératif de sûreté de fonctionnement du système électrique. De plus, il aggrave le risque de dépassement de l'intensité admissible sur l'axe sud issu de Manuel. Cette technique ne constitue donc pas une réponse possible à l'insertion du groupe Flamanville 3 dans le réseau de transport.

Étude n°4 : mise en place d'automates de déclenchement aux bornes des groupes de production de Flamanville

◆ **En quoi cela consiste ?** Un automate de déclenchement instantané aux bornes de chaque groupe de production de Flamanville aurait pour but de **déconnecter très rapidement du réseau** un groupe de Flamanville susceptible de perdre le synchronisme lors d'un court-circuit. La puissance à resynchroniser étant diminuée d'un tiers, les groupes restants auraient donc plus de chance de se resynchroniser après l'élimination du court-circuit. En réagissant instantanément lors d'un court-circuit sur une ligne, un tel automate permettrait de conserver les deux autres groupes en fonctionnement synchrone.

◆ **Les utilisations habituelles** : Cette technique est utilisée pour des groupes non nucléaires (hydrauliques ou thermiques à flamme) de puissance moindre que celle des groupes de Flamanville, précisément pour éviter les ruptures de synchronisme en cas de court-circuit, mais pour lesquels les risques d'affecter la sûreté de fonctionnement du système électrique sont nuls.

◆ **Avantages** : Cette technologie présenterait deux avantages : **son faible coût** et son impact quasi nul sur l'environnement.

◆ **Inconvénients** : **Quatre obstacles majeurs** s'opposent toutefois à l'installation d'automates de déclenchement dans le cas de la mise en service du groupe Flamanville 3 :

- L'automate n'apportant **pas de capacité de transit supplémentaire**, il n'a d'impact ni sur les risques de dépassement de l'intensité maximale admissible, ni sur les risques d'écroulement de tension.

- Pour certaines localisations du court-circuit proches de Manuel, **le risque de perte de synchronisme existe toujours** malgré la déconnexion rapide d'un groupe. Cet automate ne permet donc pas de couvrir tous les cas de court-circuit.

- Le risque pris en cas de défaillance de l'automate est très important : **si l'automate ne répond pas à une sollicitation**, on est dans le cas critique où **le réseau**, sans renforcement, **risque la coupure généralisée dans le Cotentin**, pouvant se propager à des zones voisines.

- L'impact des arrêts brutaux répétés sur les machines de la centrale : en cas de court-circuit proche de la centrale (phénomène qui n'est pas rare), ou de fonctionnement intempestif de l'automate, **un groupe de production nucléaire subirait un arrêt brutal**. Ce genre d'événement provoque des contraintes mécaniques sur les équipements électriques de la centrale.

◆ **Coût** : De l'ordre d'**un million d'euros**.

◆ **Efficacité** : L'automate a une **efficacité limitée**. De plus, il induirait les risques techniques évoqués ci-dessus. Il ne constitue donc pas une réponse au problème du maintien du synchronisme dans le Cotentin.





ACTIONS NON EFFICACES

POUR L'AMÉLIORATION DU LIEN SYNCHRONISANT

Étude n°5 : remplacement des câbles conducteurs des lignes existantes en conservant les pylônes

- ◆ **En quoi cela consiste ?** Il s'agit de **remplacer les câbles conducteurs existants par de nouveaux câbles**, utilisant des matériaux plus performants, en respectant le gabarit des anciens câbles conducteurs pour pouvoir les placer sur les pylônes existants.
- ◆ **Les utilisations habituelles :** Ces câbles conducteurs, développés récemment, **augmentent la capacité de transport** d'une ligne aérienne.
- ◆ **Efficacité :** La géométrie de la disposition des câbles conducteurs dans l'espace est le principal paramètre qui fixe la qualité du lien synchronisant pour une ligne aérienne. En remplaçant les conducteurs des lignes actuelles, sans modifier les pylônes, **on n'améliore pas le lien synchronisant**. Cette solution ne permet donc pas de faire face au risque de perte de synchronisme.

Étude n°6 : remplacement des câbles conducteurs des lignes existantes et des pylônes

- ◆ **En quoi cela consiste ?** Cette action consisterait à **modifier significativement la géométrie de la ligne**, en reconstruisant une nouvelle ligne pouvant supporter des câbles conducteurs plus importants en masse et/ou en diamètre.
- ◆ **Les utilisations habituelles :** Cette action est mise en œuvre pour **moderniser et fiabiliser une ligne aérienne**.
- ◆ **Efficacité :** Cette action **ne permettrait pas d'établir un lien synchronisant suffisant entre le Nord Cotentin et le reste du réseau**, sauf si la nouvelle ligne comporte quatre circuits (voir étude n°1). De plus, les travaux de reconstruction d'une ligne existante ne peuvent se faire sans imposer l'arrêt d'au-moins un des groupes de production actuels de Flamanville. Le coût de cet arrêt d'un groupe de production pendant au moins deux ans (durée minimale du chantier de reconstruction d'une ligne) représente **un coût très important, supérieur au double du coût de la ligne Cotentin - Maine**, qui s'ajoute au coût des travaux.



Étude n°7 : remplacement de la ligne existante par une ligne à courant continu

- ◆ **En quoi cela consiste ?** Du courant continu peut être obtenu à partir de courant alternatif, grâce à une « **station de conversion** ». La ligne à courant continu insérée dans un réseau électrique devrait donc comporter un tel dispositif à **chacune de ses extrémités**. Il est possible d'utiliser ensuite les pylônes et câbles conducteurs d'une des liaisons à courant alternatif existantes, moyennant le remplacement des isolateurs et de légères adaptations des pylônes.
- ◆ **Les utilisations habituelles :** Ce genre de système est **très cher** (environ 400 millions d'euros pour deux stations de conversion dans le cas d'une ligne à 400 000 volts, auxquels il faut ajouter le coût de modification de la ligne existante). Il est utilisé au Canada, au Brésil ou en Russie, où l'on transporte de très fortes puissances sur de très grandes distances, et pour des liaisons d'interconnexion sous-marines importantes, où il n'est techniquement pas possible d'utiliser une liaison à courant alternatif, par exemple entre la France et l'Angleterre.
- ◆ **Efficacité :** Une ligne à courant continu **n'est pas efficace en cas de rupture de synchronisme**. Lors d'un court-circuit, les stations de conversion se déconnectent pour se protéger. La ligne à courant continu ne se reconnecte qu'au bout de quelques dixièmes de secondes après élimination du court-circuit, c'est-à-dire trop tard pour aider à la re-synchronisation. L'utilisation de cette technologie aggrave fortement la situation, car une des liaisons à courant alternatif n'existe plus donc le lien synchronisant est globalement affaibli.

Étude n°8 : construction d'une liaison à courant continu supplémentaire

- ◆ **En quoi cela consiste ?** Le réseau est renforcé par l'**ajout d'une ligne à courant continu**.
- ◆ **Les utilisations habituelles :** Identiques au cas précédent.
- ◆ **Efficacité :** Comme dans le cas précédent, la ligne à courant continu n'est **pas efficace en cas de rupture de synchronisme**. Ce renforcement améliore légèrement la situation actuelle, mais pas suffisamment pour que le risque de perte de synchronisme soit écarté. De plus, elle a un coût très important, supérieur au double du coût de la ligne aérienne.

Étude n°9 : Installation d'un Compensateur Statique de Puissance Réactive (CSPR)

- ◆ **En quoi cela consiste ?** Le CSPR est un **dispositif électronique de réglage de la tension**. Comme indiqué au chapitre 4, l'installation de deux appareils de ce type est en cours en Bretagne pour améliorer le plan de tension en cas d'incident.
- ◆ **Les utilisations habituelles :** Les CSPR sont utilisés pour **lutter contre le risque d'écroulement de tension** dans les réseaux éloignés des sites de production. Ils sont également utilisés dans les installations industrielles absorbant des puissances fortement variables (comme les aciéries électriques par exemple), afin de limiter les fluctuations de tension.
- ◆ **Efficacité :** Le CSPR n'a **pas d'impact sur le lien synchronisant**. Dans le cas d'un court-circuit proche, le dispositif s'efface et ne retrouve sa pleine fonction que lorsque la tension du réseau a été restaurée, c'est-à-dire, en général, trop tard pour stabiliser des groupes en train de perdre le synchronisme. Il est donc inefficace pour l'insertion du groupe de production Flamanville 3 dans le réseau de transport.

Étude n°10 : utilisation d'une liaison à 750 000 volts

- ◆ **En quoi cela consiste ?** Les liaisons à 750 000 volts, voire plus, sont utilisées dans des pays très vastes (Canada, États-Unis, Russie) afin de **limiter les pertes par « effet Joule »** dans le transport d'électricité : à puissance transmise identique, elles sont divisées par quatre quand on double la tension. Pour étudier l'intérêt d'une liaison à 750 000 volts pour résoudre les problèmes techniques posés par le groupe de production Flamanville 3 au réseau d'interconnexion, trois pistes ont été envisagées :
 1. le remplacement de la ligne Manuel – Launay – Domloup existante par une ligne à 750 000 volts à un seul circuit, ce qui permettrait de conserver la largeur et la hauteur des pylônes
 2. le remplacement de la ligne Manuel – Launay – Domloup existante par une ligne à 750 000 volts à deux circuits
 3. la construction d'une ligne supplémentaire à 750 000 volts à un circuit
- ◆ **Les utilisations habituelles :** L'utilisation de niveaux de tension supérieurs à 400 000 volts a été évoquée pour la France dans des études prospectives menées il y a une trentaine d'années, à une époque où les perspectives de croissance de consommation d'électricité étaient beaucoup plus élevées que ce qui a été constaté par la suite.
- ◆ **Efficacité :** en reprenant les trois pistes évoquées ci-dessus :
 1. Le remplacement d'une ligne double à 400 000 volts par une ligne simple à 750 000 volts présente la **même qualité de lien synchronisant** : en effet, il faut transformer l'énergie à chaque extrémité, ce qui supprime le bénéfice de l'augmentation de la tension. Par ailleurs, les pylônes de la ligne actuelle ne peuvent être utilisés pour accepter le niveau de tension de 750 000 volts. Il serait donc nécessaire de reconstruire la ligne en lieu et place, ce qui est inenvisageable vu les contraintes liées aux consignations.
 2. La ligne double à 750 000 volts nécessite **des pylônes plus hauts et plus chers** que les pylônes à 400 000 volts. Cette solution se heurte encore à l'impossibilité de reconstruire en lieu et place.
 3. Une nouvelle ligne à 750 000 volts simple circuit est environ **40 % plus chère qu'une nouvelle ligne à 400 000 volts double circuit**, pour une efficacité moindre du point de vue du synchronisme et du transit. Un court-circuit conduit en effet à la mise hors tension de la ligne à 750 000 volts dans son ensemble, alors qu'un seul des deux circuits d'une ligne double à 400 000 volts serait concerné.

Étude n°11 : utilisation d'une liaison à 225 000 volts

- ◆ **En quoi cela consiste ?** Cette action consiste à **créer une nouvelle ligne à 225 000 volts** entre le Nord Cotentin et le reste du réseau, afin d'améliorer la tenue du synchronisme.
- ◆ **Les utilisations habituelles :** Jusque dans les années 1960, le réseau d'interconnexion était constitué par des ouvrages à 225 000 volts. Le réseau à 400 000 volts l'a ensuite remplacé dans ce rôle. Aujourd'hui, le réseau à 225 000 volts a un **rôle de répartition régionale de la puissance**, et d'alimentation des villes, de certaines usines de puissance importante, et de lignes ferroviaires à grande vitesse.
- ◆ **Efficacité :** Le **lien synchronisant** apporté par une liaison à 225 000 volts **n'est pas suffisant** car le niveau de tension est inférieur au niveau de tension de raccordement de la centrale.

