



Gestionnaire
du Réseau de Transport d'Électricité

PROJET DE LIGNE ELECTRIQUE A 400 000 V « COTENTIN – MAINE »

**EXPERTISE DE LA SOCIETE CESI SUR LES ALTERNATIVES
A LA LIGNE A TRES HAUTE TENSION COTENTIN-MAINE**

REMARQUES DE RTE

Le 22 février 2006

Présentation du document

Lors de sa réunion du 2 novembre 2005, sur proposition du président de la Commission particulière du débat public « THT Cotentin – Maine », la Commission nationale du débat public a décidé : « Une expertise complémentaire sur les alternatives techniques à la ligne THT sera effectuée par un cabinet d'experts indépendant qui devra identifier, analyser les diverses solutions et évaluer leurs conditions de réalisation et leurs impacts. »

Après consultation légale, elle a choisi la société italienne CESI pour effectuer cette expertise.

CESI a audité les alternatives techniques à la ligne aérienne à très haute tension Cotentin – Maine proposées par RTE dans son dossier du maître d'ouvrage et a examiné les autres alternatives envisageables.

Dans ce cadre, RTE a fourni de façon totalement transparente à la société CESI l'ensemble des données techniques que cette dernière souhaitait utiliser ou analyser, notamment dans le cadre de l'examen des conséquences de l'arrivée du projet de groupe de production Flamanville 3 pour le réseau de transport d'électricité.

L'expertise de CESI a été rendue publique le 10 février 2006 par la Commission particulière du débat public « THT Cotentin – Maine » et elle a été présentée en réunion publique le 14 février 2006 à Fougères

Le présent document a pour but de donner la liste des points de convergence entre les analyses du CESI et celles de RTE, points de convergence qui sont largement majoritaires, et d'explicitier quelques écarts entre ces analyses.

Les avis de CESI sur les différentes alternatives techniques sont donnés en annexe.

1. De nombreux points de convergence entre les études de RTE et les études de CESI

Diagnostic de l'impact de la mise en service du groupe de production Flamanville 3 sur le réseau de transport

Dans son chapitre 4, l'expertise de CESI confirme que le réseau actuel ne peut supporter l'ajout de 1600 MW de production dans le Nord Cotentin, qu'un renforcement du réseau de transport en 400 000 volts sur deux circuits est nécessaire et que ce renforcement doit être en direction du sud.

Ces résultats, dont la synthèse figure au § 4.3.3 p.132, confirment la proposition faite par RTE dans son dossier du maître d'ouvrage.

Alternatives pour lesquelles les avis de CESI et de RTE convergent

- **Ligne quadruple terne** : Cette alternative est efficace techniquement mais inacceptable du point de vue économique car il faudrait mettre la ligne existante hors service. RTE estime en outre qu'une telle alternative accroîtrait l'impact sur l'environnement.
- **La liaison souterraine en câble à isolation synthétique** : Cette alternative serait une première mondiale et elle incertaine en matière de fiabilité. Les réalisations actuelles sont très éloignées de la longueur de la liaison Cotentin – Maine, et la question de la compensation intermédiaire de la puissance réactive n'a reçu de réponse qu'au plan théorique. Cette alternative présente un coût d'investissement de l'ordre de 11 fois plus important que la ligne aérienne pour CESI, 9 fois plus pour RTE.
- **La liaison souterraine en câble à isolation gazeuse** : Cette technologie pose des problèmes de faisabilité sur une grande distance et présente un coût encore plus important que le câble à isolation synthétique. Elle n'est pas adaptée au cas du projet Cotentin – Maine.
- **La compensation série** : Les condensateurs en série offrent une réponse théoriquement valable pour le maintien du synchronisme mais conduisent dans la pratique à des risques inacceptables.
- **Le remplacement des câbles conducteurs des lignes existantes et des pylônes**. Cette alternative est inefficace du point de vue de l'amélioration du lien synchronisant et inacceptable car il faudrait mettre la ligne existante hors tension pendant une longue période.
- **Le remplacement de la ligne existante par une ligne à courant continu** : Cette alternative est inefficace du point de vue de l'amélioration du lien synchronisant et inacceptable parce qu'il faudrait mettre la ligne existante hors tension pendant une longue période.
- **La construction d'une liaison à courant continu supplémentaire** : Cette alternative est inefficace du point de vue de l'amélioration du lien synchronisant et présente un coût élevé.

Alternatives supplémentaires proposées par CESI

RTE partage l'avis de CESI sur les propositions suivantes :

- **Ligne simple terne** : Cette alternative est inefficace du point de vue de l'amélioration du lien synchronisant. C'est pour cela que RTE ne l'avait pas évoquée dans son dossier.
- **L'utilisation combinée de compensation série et d'une ligne simple terne / d'un câble enterré / d'une ligne à courant continu** : Cette alternative se heurte aux réserves de faisabilité de la compensation série exposées ci-dessus, et n'évite pas la construction d'une ligne. RTE confirme que cette alternative n'est pas une réponse adaptée à l'insertion de Flamanville 3 dans le réseau électrique. RTE précise en outre que son coût est proche de celui du projet Cotentin – Maine pour la ligne aérienne, et très supérieur pour le câble enterré / la ligne à courant continu.

- **L'utilisation d'une liaison sous-marine** : Cette alternative doit faire appel à la technique du courant continu compte tenu de la distance à parcourir. Or une liaison en courant continu ne permet pas de résoudre le risque de perte de synchronisme. RTE confirme que cette alternative n'est donc pas adaptée à l'insertion de Flamanville 3 dans le réseau électrique.
- **Le câble supra-conducteur** : C'est une technologie expérimentale, au stade du prototype de quelques dizaines de mètres. Elle poserait un tel nombre de problèmes pour un dimensionnement aussi important en puissance et en longueur dans le cas du projet Cotentin – Maine que son utilisation n'est pas envisageable.

Alternatives écartées par RTE, non citées par CESI

Les alternatives suivantes, que RTE avait écartées car elles ne permettant pas d'améliorer le lien synchronisant, n'ont pas été reprises par CESI :

- **Le remplacement des câbles conducteurs des lignes existantes sans renforcement des pylônes.**
- **L'installation d'un compensateur statique de puissance réactive (CSPR).**
- **L'utilisation d'une liaison à 225 000 volts.**
- **L'utilisation d'une liaison à 750 000 volts** (remplacement de la ligne existante par une ligne à 750 000 volts à un seul circuit).

Les alternatives suivantes, que RTE avait écartées car réductrices au plan technique ou économique, n'ont pas été reprises par CESI :

- **L'utilisation d'une liaison à 750 000 volts** (remplacement de la ligne existante par une ligne à 750 000 volts à deux circuits) : Cette alternative est inacceptable car il faudrait mettre la ligne existante hors tension pendant une longue période. En outre, elle aurait un impact environnemental très important.
- **L'utilisation d'une liaison à 750 000 volts** (construction d'une ligne supplémentaire à 750 000 volts à un circuit) : Cette alternative serait environ 40 % plus chère qu'une nouvelle ligne double circuit à 400 000 volts, pour une efficacité moindre du point de vue du synchronisme et du transit.
- **L'automate de déclenchement des groupes de production** : Cette alternative n'apparaît qu'indirectement dans l'expertise de CESI. Elle aurait une efficacité limitée et présenterait des risques inacceptables pour la sûreté de fonctionnement du réseau électrique car le risque de perte de synchronisme existerait encore. En outre, elle ne permettrait pas de résoudre le problème de transit.

Compte tenu du caractère très complet de l'expertise de CESI, et notamment du nombre d'alternatives supplémentaires proposées, il est probable que ces cas n'ont pas été pris en compte par CESI car ils n'apportent pas de solution à l'insertion du groupe de production Flamanville 3 dans le réseau électrique.

2. Explication de quelques écarts

CESI a proposé certaines options assorties des réserves. Pour certaines d'entre elles, RTE considère qu'elles ne conviennent pas dans le cas du projet Cotentin – Maine, qui est un ouvrage important pour la sûreté de fonctionnement du réseau électrique.

- **Le dimensionnement de la liaison souterraine pour un siphon :** CESI a étudié deux dimensionnements, l'un avec deux tricâbles (en reconnaissant que le service rendu par l'ouvrage serait alors fortement limité par rapport à la ligne aérienne complète), et l'autre avec quatre tricâbles, qui est présenté comme la solution « la plus rationnelle du point de vue du gestionnaire de réseau ».

Les calculs réalisés par RTE montrent que l'alternative à deux tricâbles ne permet pas de transporter dans tous les cas de figure la puissance pouvant circuler dans la ligne Cotentin – Maine. De plus, RTE précise qu'elle conduit à des indisponibilités longues en cas d'avarie. Elle n'est donc pas envisageable et un siphon ne pourrait être dimensionné qu'avec quatre tricâbles (deux tricâbles par circuit de la ligne aérienne).

- **La possibilité de construire une liaison souterraine de 150 km de long :** CESI indique que cette alternative serait une première mondiale, conduisant à des problèmes techniques importants.

RTE considère que la construction d'une telle liaison serait un pari trop risqué et met en doute la faisabilité et l'exploitabilité d'un tel ouvrage. Pour RTE, cette option ne peut être considérée comme une solution à l'insertion du groupe de production Flamanville 3 dans le réseau électrique.

CESI a également proposé une option, dont RTE estime qu'elle ne convient pas dans le cas du projet Cotentin – Maine pour une raison d'impact environnemental :

- **L'utilisation de deux lignes à un seul circuit à la place d'une ligne à deux circuits :** Compte tenu des caractéristiques de la zone, cette alternative ne semble pas pertinente à RTE tant du point de vue de l'impact environnemental que du coût, alors que le tableau de synthèse de CESI semble montrer qu'elle est un peu meilleure que la solution de la ligne double terre proposée par RTE.

ANNEXE – DÉTAIL DES DIFFÉRENTES ALTERNATIVES

A. Diagnostic de l'impact de la mise en service du groupe de production Flamanville 3 sur le réseau de transport

L'étude de CESI confirme que le réseau actuel ne peut supporter l'ajout de 1600 MW de production dans le nord Cotentin. Un renforcement du réseau de transport est nécessaire :

« Le système électrique non renforcé et en présence du nouveau groupe de génération EPR3 à Flamanville (production nette de 1600 MW) ne garantit pas un lien synchronisant suffisamment fort »

« Le système électrique n'est pas apte à maintenir des conditions acceptables de fonctionnement en cas de déclenchement d'un circuit à 400 kV », « Il faut donc prévoir des renforcements convenables du réseau afin d'assurer une exploitation sûre et fiable du système » (§ 4.2.2.1).

L'étude de CESI confirme que ce renforcement ne peut avoir lieu qu'en 400 000 volts sur deux circuits :

« Options de réalisation

La ligne d'interconnexion objet de l'étude est une ligne de grande envergure; la puissance à transporter étant très élevée, le niveau de tension 400kV sur deux circuits s'impose. La section des conducteurs en alliage d'aluminium doit être d'au moins 1500 mm² pour chacun des circuits. » (§ 3.1.9)

L'étude de CESI confirme que ce renforcement doit être en direction du sud :

« l'étude exécutée dans l'hypothèse d'un renforcement en ligne aérienne en double circuit a montré que le renforcement selon l'axe nord-sud est le plus convenable sous tous les points de vue » (§ 4.2.3).

B. Avis de CESI sur les alternatives que RTE a qualifiées de « techniquement efficaces pour l'amélioration du lien synchronisant » dans le dossier du maître d'ouvrage

Etude n°1 : la ligne quadruple terre

Efficace théoriquement :

« cette ligne résout tous les problèmes d'écroulement de tension dans le Nord-Ouest de la France et a la même efficacité que la ligne double circuit » (§ 4.3.1.3)

La construction d'une ligne quadruple terne à la place d'une ligne existante se heurte à une difficulté pratique rédhibitoire :

« Toute opération qui comporte la mise hors tension de la ligne Manuel-Launay-Domloup est à proscrire : en effet la mise hors service de cette ligne comporterait un affaiblissement insoutenable du réseau qui, même en conditions de fonctionnement sans indisponibilité d'ouvrages, porterait les lignes avoisinantes et le réseau 225 kV en surcharge avec effondrement. Cette constatation nous porte à exclure toute hypothèse de renforcement de cette ligne (car les travaux nécessaires porteraient à une indisponibilité d'environ deux ans) ».

La construction doit donc se faire sur un autre tracé :

« le remplacement de la ligne actuelle par une ligne en quadruple terne ne pourrait se faire qu'en construisant une nouvelle ligne à quatre ternes en parallèle à la ligne actuelle et en déposant successivement la ligne : cette hypothèse, quoique peu rationnelle, est prise en compte dans l'étude d'ingénierie de base, pour devoir de complétude » (§ 6.1).

La ligne quadruple terne nécessite alors de chercher un tracé pour un ouvrage de plus fort impact visuel et de plus forte emprise au sol. Cette alternative n'apporte donc pas de gain, ni pour l'environnement, ni du point de vue économique.

Etude n°2 : la liaison souterraine

Au plan de l'efficacité technique, CESI souligne l'absence d'expérience dans la réalisation d'une telle liaison. Ainsi que le montre la synthèse de CESI, avec un dimensionnement à deux tricâbles, d'une part la liaison ne remplirait pas les « *critères réseau* », d'autre part la « *flexibilité d'exploitation* » et la « *fiabilité attendue* » ne seraient pas suffisantes.

Un dimensionnement à trois ou quatre tricâbles offrirait un résultat incertain quant à la « *flexibilité d'exploitation* » et à la « *fiabilité attendue* ». Ces options sont discutées dans un chapitre suivant.

Au plan de l'efficacité économique, un dimensionnement à quatre tricâbles présente selon CESI un coût d'investissement de l'ordre de 11 fois plus important que la ligne aérienne (voir le coût de la liaison souterraine dans le § 3.2.9.1 du rapport de CESI « *4 ternes en fourreau pose en trèfle (2500 mm²) : 5 550 000 euros/km* » et le coût de la liaison aérienne dans le § 3.1.8.1 du rapport de CESI « *Une ligne double terne à deux câbles par phase avec poteaux treillis : 480 000 euros/km* »).

Les impacts sur l'environnement sont décrits dans le § 3.2.8 du rapport de CESI.

Etude n°3 : les condensateurs en série

Ils offrent une réponse théoriquement valable pour le maintien du synchronisme, mais conduisent dans la pratique à des risques inacceptables.

De plus, cette alternative ne permet pas de résoudre le problème des flux de puissance (voir §4.3.1.12 et 4.3.1.13 du rapport de CESI : « *Le réseau sans renforcement additionnel ne peut pas soutenir les contingences à l'Ouest* »).

Elle présente des risques pour la sûreté de fonctionnement du réseau électrique (« l'introduction de la compensation série pourrait provoquer des phénomènes de résonance hyposynchrones sur les axes des turbogénérateurs. Pour cette raison il faut être prudent à prendre en compte cette solution, qui mérite d'être étudiée en détail avec des outils appropriés » §4.3.3 ; « La présence de compensation série peut causer la résonance entre les fréquences d'oscillation du réseau et celles mécaniques du turboalternateur. Dans le cas où ces fréquences ne sont pas amorties les efforts mécaniques sur l'axe tournant peuvent causer la rupture de l'axe même avec hors service permanent du générateur. Le danger de l'instauration d'oscillations hyposynchrones est considérablement élevé dans la région Cotentin-Maine caractérisée par plusieurs centrales thermiques de différentes typologies et, donc, ayant des axes avec différentes valeurs propres d'oscillation. Ces possibles oscillations, liées aux caractéristiques physiques de l'axe turbine-alternateur ne peuvent pas être modifiées lorsque la machine a été fabriquée. De plus, il faut noter que les caractéristiques de l'axe EPR ne sont pas encore connues et ne peuvent être prédites ni calculées à l'heure actuelle » § 6.1).

Etude n°4 : les automates de déclenchement

Cette alternative étudiée par RTE ne l'a pas été directement étudiée par CESI. Elle est toutefois couverte par l'étude de la « solution minimale conduisant à ne construire aucun nouvel ouvrage dans la région », au § 4.2.2.1 du rapport de CESI.

Il s'avère que cette alternative ne permet pas de résoudre le lien synchronisant devant être renforcé entre le Cotentin et le reste du réseau, ni le problème de capacité de transport sur l'axe sud.

C. Avis de CESI sur les alternatives que RTE a qualifiées de « non efficaces pour l'amélioration du lien synchronisant » dans le dossier du maître d'ouvrage

Les alternatives étudiées par CESI confirment un certain nombre de conclusions de RTE.

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

Cette technique est évoquée au § 6.1 du rapport de CESI :

« cette solution, qui permettrait d'élever la puissance de transit de la ligne existante d'environ 25%-30%, n'est pas à prendre en compte pour la raison déjà exposée sur l'irremplaçabilité de la ligne actuelle et pour le fait que cette intervention, tout en permettant une prise de charge potentielle plus élevée de la ligne (en tous cas insuffisante pour l'évacuation de la puissance du groupe 3 de Flamanville) ne permettrait pas de garantir le lien synchronisant nécessaire au groupe. De plus, le coût des conducteurs (dépassant celui des conducteurs conventionnels de plus de 50%, le coût de la modification des poteaux dont la structure devrait être renforcée pour supporter le poids supplémentaire des conducteurs), le niveau de pertes liées aux caractéristiques des conducteurs à utiliser rendrait très peu économique l'exploitation de cette ligne »

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

Cette alternative fait l'objet des § 3.6.6 et 4.3.1.4, puis est étudiée en tant qu'alternative « H1 » dans le § 6.9 du rapport de CESI. Dans le § 4.3.3, elle est indiquée comme non efficace pour le lien synchronisant :

« Le renforcement du réseau avec une ligne à courant continu (HVDC) de capacité de 1600MW, en parallèle à la ligne 400 kV double circuit en courant alternatif Manuel-Launay-Domloup existante, ne garantit pas un lien synchronisant suffisamment fort, bien que, pour l'écoulement de charge en N et N-1, se révèle efficace comme la solution de renforcement sur l'axe Nord-Sud par une ligne aérienne additionnelle 400kV en double circuit ».

Cette alternative est malgré tout étudiée par CESI, ce qui conduit à un coût d'investissement 4 fois plus élevé que celui de la ligne aérienne.

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

Cette alternative est étudiée au § 4.3.1.5 : » : *« cette solution n'est pas faisable, car la transformation de la ligne existante Manuel-Domloup en courant continu implique sa mise hors service pour plusieurs mois et pendant cette période il est impossible d'exploiter tous les groupes de la centrale de Flamanville. De plus, cette solution, basée sur un couloir Nord-Sud tout en courant continu, ne garantit pas un lien synchronisant suffisant (marge de stabilité inacceptable). »*

Les alternatives suivantes, que RTE avait d'ailleurs déjà écartées dans son étude, n'ont pas été reprises par CESI :

- **Etude n°5 : le remplacement des câbles conducteurs des lignes existantes**
- **Etude n°9 : l'installation d'un compensateur statique de puissance réactive (CSPR)**
- **Etude n°11 : l'utilisation d'une liaison à 225 000 volts** (cette solution a été écartée par CESI au § 3.1.9 – cf. A ci-dessus).

Ces alternatives ne permettent pas d'améliorer le lien synchronisant, c'est pourquoi elles sont inefficaces dans le cas de l'insertion du groupe de production Flamanville 3 dans le réseau électrique.

Le cas de **l'étude n°10 (utilisation d'une liaison à 750 000 volts)** est un peu différent. Il s'agit d'une alternative inefficace pour le lien synchronisant si l'on transforme une ligne du réseau actuel à 400 000 volts en liaison à 750 000 volts, mais efficace si l'on construit une nouvelle ligne à 750 000 volts.

Cette construction d'une nouvelle ligne à 750 000 volts présenterait un impact visuel et un coût supérieurs à la ligne à 400 000 volts double circuit proposée par RTE pour le projet Cotentin – Maine. C'est sans doute pour ces raisons qu'elle n'a pas été étudiée par CESI.

D. Alternatives étudiées par CESI ne figurant pas dans le dossier du maître d'ouvrage de RTE

CESI a proposé des alternatives que RTE n'avait pas développées. Aucune de ces alternatives ne représente une réponse satisfaisante à l'insertion du groupe de production Flamanville 3 dans le réseau de transport.

L'utilisation de deux lignes à un seul circuit

Cette alternative consiste à construire deux nouvelles lignes à un seul circuit au lieu d'une ligne à deux circuits (configuration « L2 » au § 6.3). Elle présente l'avantage de limiter la hauteur et la largeur des pylônes. L'inconvénient majeur est le fait de devoir construire deux fois plus de pylônes et d'avoir une emprise au sol très supérieure puisqu'il faut implanter deux lignes sur deux tracés différents. Compte tenu des caractéristiques de la zone, cette alternative ne semble pas pertinente à RTE. De plus, elle est d'un coût nettement supérieur à la solution préconisée par RTE.

L'utilisation combinée de la compensation série et d'une ligne simple circuit / d'un câble enterré / d'une ligne à courant continu

Cette alternative étudiée au § 6.11 se heurte aux réserves de faisabilité de la compensation série exposées ci-dessus pour l'étude n°3. Elle n'évite pas la construction d'une nouvelle ligne. Elle en réduit légèrement le coût et l'impact visuel, au prix d'un risque pour la sûreté de fonctionnement du réseau électrique. Elle n'est donc pas préconisée par CESI.

L'utilisation d'une liaison sous-marine

Cette alternative, étudiée au § 4.3.2, a été également évoquée dans un cahier d'acteurs. Elle se décline en deux options : en direction de la Bretagne Nord ou en direction de la Seine Maritime. Dans ces deux cas, la réalisation d'une liaison en courant continu ne permet pas de résoudre le risque de perte de synchronisme.

De plus, la ligne en direction de la Bretagne Nord conduit à des congestions du réseau de la Bretagne Nord qui n'est pas dimensionné pour accueillir une telle puissance injectée directement (voir § 4.3.2.2), et le risque d'écroulement en tension est aggravé.

Concernant la ligne vers la Seine Maritime, le bilan est moins négatif mais CESI indique que « *on constate que cette ligne ne résout aucun problème d'écroulement de tension dans le Nord-Ouest de la France détecté dans le réseau sans renforcements* » et « *l'écoulement de puissance sur le nouvel axe en courant continu vers Le Havre revient partiellement vers Manuel provenant de Terrette* », ce qui signifie que le renforcement de réseau conduit à faire parcourir à l'énergie électrique un chemin beaucoup plus long.

Cette alternative a été étudiée dans l'étude d'ingénierie de CESI au § 6.10 (configuration « M1 »). Elle conduit à un coût de l'ordre de 9 fois plus élevé que la ligne aérienne en matière d'investissement.

L'utilisation d'un câble à isolation gazeuse

Cette technologie de câble souterrain est plus onéreuse que le câble à isolation synthétique examiné par RTE pour l'essentiel de son étude n°2 ainsi que par CESI pour l'essentiel de ses évaluations de la technologie souterraine.

Le § 6.8, qui analyse la configuration « G1 » en câble à isolation gazeuse indique un coût d'investissement de l'ordre de 19 plus élevé que la ligne aérienne. Cette alternative, privilégiée pour les centres-villes, où le coût de l'espace et la densité de puissance à transporter pourraient justifier un coût linéaire si important, n'est pas adaptée au cas du projet Cotentin – Maine.

Le câble supra-conducteur

CESI a étudié cette alternative au § 3.7. La conclusion est la non-faisabilité en l'état actuel de la technologie :

« L'application de la technologie SHT est théoriquement possible pour cette ligne d'interconnexion, mais il faut remarquer les points suivants : une application SHT à 400kV n'aurait aucun sens dans la mesure où la technologie SHT est particulièrement performante en termes de courant transporté : le transport de 4000 MVA ne nécessiterait pas une tension de 400kV en SHT mais un système de deux câbles 225 kV 5 kA serait amplement suffisant ; pour garantir un niveau de sécurité de fonctionnement adéquat il serait nécessaire de disposer de n.2 câbles par phase ; la connexion devrait être composée de tronçons de faible longueur (max 2 km) ; la réalisation d'une telle ligne est à la limite de la technologie et comporterait d'énormes problèmes techniques, en particulier en ce qui concerne les accessoires et le système de réfrigération ; les coûts de réalisation d'une ligne avec cette technologie sont actuellement incalculables. Cette technologie ne sera donc pas prise en compte dans le développement de cette étude. »

E. Analyse des écarts de coûts des alternatives souterraines entre CESI et RTE

Les différentes façons de considérer le coût d'un ouvrage

Le débat public a donné lieu à des querelles de chiffres sur les coûts de la technologie souterraine, qui ont apporté une certaine confusion car les règles de calcul de ces coûts n'ont pas toujours été explicitées.

Le lecteur trouvera dans ce paragraphe une information sur les différents coûts utilisés pour évaluer les investissements dans le domaine des réseaux électriques.

RTE a présenté dans le dossier du maître d'ouvrage le coût d'investissement total (ou « coût d'investissement brut ») des solutions aérienne et souterraine, ainsi que le ratio entre les deux. Ce ratio est estimé par RTE à 9 pour le cas du projet Cotentin – Maine. Le coût d'investissement total est l'ensemble des dépenses consenties par RTE pour faire construire l'ouvrage. C'est une des façons de considérer le coût d'un chantier.

Il est également souhaitable de considérer, en complément du coût d'investissement, le coût complet, ou « coût sur le cycle de vie », qui intègre l'ensemble des dépenses liées à l'ouvrage sur une longue durée. Ces dépenses supplémentaires sont : les coûts d'entretien, de réparation en cas d'avarie, des achats d'énergie pour compenser les pertes par Joule dissipées dans l'ouvrage, ainsi que de démantèlement. Ce coût « cycle de vie » est plus favorable à la technologie du câble souterrain, car les pertes par effet Joule sont moins importantes en souterrain qu'en aérien.

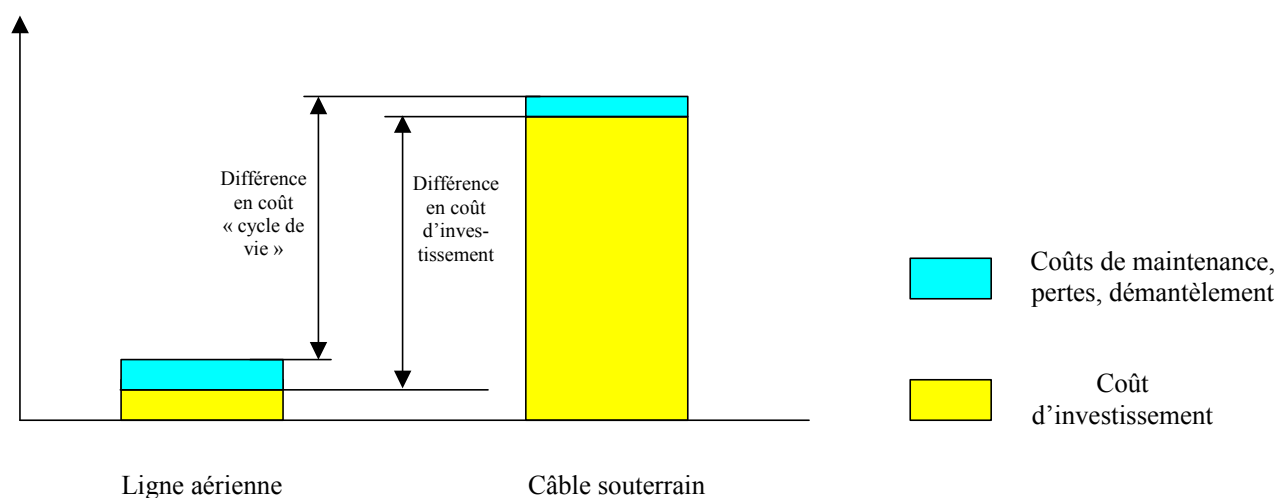
Le coût « cycle de vie » a été estimé par RTE et les résultats sont présentés dans le document « Etude des alternatives à la ligne aérienne » rédigé le 22 novembre 2005 à la demande de la Commission particulière du débat public. Le ratio en coût « cycle de vie » entre l'aérien et le souterrain a été estimé par RTE à une fourchette comprise entre 5,4 et 6.

Dans certains domaines, la comparaison des coûts « cycle de vie » peut inverser l'ordre de mérite de différentes alternatives. C'est le cas, par exemple, pour certains conducteurs électriques, qui coûtent un peu plus chers que les conducteurs électriques classiques mais qui sont moins résistifs donc engendrent moins de pertes par effet Joule. Dans certaines conditions de prévisions de flux de puissance, on constate que, dans la durée de vie, le surcoût d'investissement est plus que compensé par le gain sur les pertes par effet Joule. On peut donc dans ce cas envisager d'investir dans un matériel plus onéreux.

Dans le cas de la comparaison entre la technologie des lignes aériennes et des liaisons souterraines en 400 000 volts, le ratio reste largement en faveur de la solution aérienne. Le choix de l'alternative souterraine ne pourrait donc être motivé par des arguments économiques, même en considérant le coût sur le cycle de vie.

On peut ajouter que le surcoût en valeur absolue, et non en ratio, est de 6,3 à 7 millions d'euros par km pour le souterrain, en coût d'investissement brut, et de 6,4 à 7,2 millions d'euros par km en coût « cycle de vie » (référence : document RTE « Etude des alternatives à la ligne aérienne » du 22 novembre 2005).

Ce différentiel en valeur absolue reste globalement identique quelle que soit la règle de calcul, ainsi que le montre le schéma suivant :



Le rapport de CESI utilise une troisième notion, qui est celle de « coût d'investissement net », utilisé pour calculer un « coût cycle de vie net ». Le coût d'investissement brut d'un ouvrage se décompose en :

- Achats réalisés par le gestionnaire de réseau (fournitures : pylônes et conducteurs essentiellement, et travaux réalisés par des entreprises de génie civil et de construction de lignes). C'est le « coût d'investissement net ».
- Frais d'études d'ingénierie, frais généraux, indemnisation des dégâts liés aux travaux, mesures compensatoires : toutes ces dépenses supplémentaires, qui entrent dans le coût d'investissement brut, n'ont pas été prises en compte par CESI.

Les coûts utilisés par CESI

On constate dans le rapport de CESI que les coûts d'investissement des technologies aériennes et souterraines sont inférieurs à ceux exposés par RTE dans son dossier du maître d'ouvrage.

Cela est dû à deux causes distinctes :

- 1) L'utilisation par CESI de coûts d'investissement nets alors que RTE a considéré les coûts d'investissement bruts (voir § précédent).
- 2) Le fait que CESI a utilisé des coûts moyens et n'a pas disposé du temps nécessaire à la prise en compte des difficultés particulières de la zone du projet Cotentin – Maine. Ces difficultés affectent les chantiers tant en aérien qu'en souterrain : sols et sous-sols de faible tenue géotechnique, présence de haies, de cours d'eau, de voies de communication à franchir. Ces surcoûts dus aux difficultés de réalisation ont été pris en compte dans les études de RTE. Ils augmentent les coûts d'investissement dans les deux technologies.

Ces deux raisons conduisent à augmenter les coûts des technologies aériennes et souterraines dans des proportions à peu près identiques. Ainsi que CESI l'a exprimé lors de la réunion publique de Fougères le 14 février 2006, les ratios entre coûts des différentes technologies sont corrects, alors que le différentiel en valeur absolue est sous-estimé.

L'alternative souterraine sur 150 km

L'alternative souterraine sur 150 km, si elle est jugée a priori techniquement faisable par CESI au § 6.4.3, CESI fait observer qu'il n'existe pas de référence dans le monde de câble de longueur supérieure à 40 km. En particulier, aucune liaison exploitée dans le monde à ce jour n'a mis en œuvre la technique de la station de compensation intermédiaire, nécessaire pour compenser la production de puissance réactive du câble souterrain.

En technique souterraine, l'ouvrage Cotentin – Maine nécessiterait trois stations de compensation successives. Du point de vue de RTE, cela reste un défi, et rien ne permet d'affirmer que l'ouvrage pourrait être testé, puis mis sous tension, et enfin résisterait à des courts-circuits. C'est pourquoi RTE considère que la réalisation d'un ouvrage 400 000 volts de 150 km de long n'est pas envisageable en réponse à l'insertion du groupe de production Flamanville 3 dans le réseau électrique.

Au-delà de la faisabilité technique, qui n'est pas assurée, se pose la question du coût.

Le rapport de CESI indique aux § 3.1.8 et 3.2.9 des coûts d'investissement dans un rapport 11 entre l'aérien et le souterrain. Au § 3.2.11, un rapport du coût complet sur le cycle de vie de 6,5 à 6,8 est annoncé. Ces résultats sont cohérents avec ceux de RTE.

Toutefois, les études génériques réalisées par CESI proposent des dimensionnements plus limités que la solution considérée par RTE. RTE considère que quatre tricâbles sont nécessaires, alors que CESI a considéré des alternatives à deux, trois et quatre tricâbles.

Deux caractéristiques des câbles sont importantes à considérer pour définir un dimensionnement :

- En premier lieu, la puissance que le câble peut transiter. Cette puissance est limitée par la température de l'âme conductrice du câble, qui ne doit pas dépasser 90 °C. Suivant les possibilités d'évacuation de la chaleur produite par l'effet Joule lors de la circulation du courant dans le câble, cette température de 90 °C peut être atteinte avec des intensités très différentes. Ce comportement thermique est lié :
 - à la profondeur (plus le câble est enterré profondément, moins la chaleur peut se dissiper ; la pose de câble en galerie ventilée, qui est très onéreuse, permet de passer des intensités plus fortes) ;
 - et à la proximité de sources de chaleur qui dans ce cas sont les autres câbles de phase du même tricâble ou les autres tricâbles de la liaison.

CESI considère qu'un tricâble peut transporter 1 000 MVA en régime normal. RTE a calculé que, dans les conditions de pose utilisées en France, la puissance qu'un tricâble peut transporter est de 873 MVA (avec deux tricâbles espacés de 2 m). Cette puissance tombe à 732 MVA en cas de sur-profondeur. Les sur-profondeurs interviennent lors de franchissements d'autoroutes, de routes nationales, de voies ferrées, de rivières. On en dénombre plusieurs dizaines sur les tracés envisageables dans la zone d'étude du projet Cotentin – Maine.

- En second lieu, la fiabilité de la liaison, qui conditionne la redondance à consentir à la conception de la liaison. CESI indique au § 3.2.7 :

« Les valeurs typiques indiquées dans la bibliographie et concernant le nombre de mises hors tension pour des lignes en câbles et aériennes sont de l'ordre de 0.001 et 0.003 interruptions /km/an tandis que les durées de réparation sont à hauteur de 200 – 400 heures/interruption et 8 – 10 heures/interruption respectivement. Avec de telles données, l'indisponibilité des lignes en câble est environ 8 fois supérieure à celle des lignes aériennes. ».

RTE a estimé un taux de défaillance de 0,004 défaut par km et par an, soit quatre fois plus élevé que le taux proposé par CESI, pour les liaisons souterraines. Ce taux est issu du retour d'expérience de RTE sur son parc de 850 km de liaisons souterraines à 225 000 volts, le parc le plus important en THT en Europe. La durée de réparation semble devoir être de l'ordre de 700 heures, pour prendre en compte l'ensemble des opérations de recherche de défaut, ouverture de tranchée, réparation, essai et remise en service. Cela conduit à ce qu'un tricâble de 150 km soit en avarie en moyenne 17 jours par an.

Cette durée d'indisponibilité est inacceptable pour un ouvrage comme Cotentin – Maine, qui est d'une grande importance pour la sûreté de fonctionnement du réseau électrique et pour l'équilibre production-consommation à l'échelle européenne.

Les calculs réalisés par RTE montrent que l'alternative à deux tricâbles ne répond pas aux besoins du réseau électrique à l'horizon 2012 en matière de transits. Ceci est confirmé par CESI dans le tableau final de synthèse de son étude.

L'alternative à trois tricâbles conduit, d'après les calculs de RTE, à ce que la capacité de transport soit légèrement insuffisante pendant les heures de pointe l'été, dans les prévisions de 2012, et avec une section de 2500 mm².

De plus, la probabilité que deux tricâbles soient simultanément en avarie est d'une fois tous les trois ans, pour une durée de 8 jours environ. Cette alternative à trois tricâbles ne satisfait donc pas le besoin du réseau pour le projet Cotentin – Maine.

Elle pourrait toutefois constituer une alternative optimisée du point de vue de l'investissement, par rapport à celle à quatre tricâbles, mais nécessiterait de toute façon une augmentation de la capacité de transport des câbles dans les franchissements particuliers grâce à l'utilisation, par exemple, de galeries ventilées ou d'une section de câble plus importante.

Cette ligne à trois tricâbles rendrait donc un service moindre que la ligne aérienne, avec un coût d'investissement inférieur d'environ un quart par rapport à celui de l'alternative à quatre tricâbles. Les ratios calculés à partir des éléments fournis par CESI sont : un ratio de 10 pour le coût d'investissement, et un ratio de 4 pour le coût cycle de vie. Compte tenu de ce qui précède, ces ratios augmenteraient si l'étude était affinée dans le contexte du projet Cotentin – Maine.

Le dimensionnement à quatre tricâbles est donc celui préconisé par RTE

Une fois le nombre de tricâbles et la section choisie, il reste la question de la compensation du réactif.

Le rapport de CESI propose au § 3.2.10 une structure de station de compensation conduisant à une surface de 6 000 m² par tricâble.

Le schéma électrique et le coût de cette station de compensation ne correspondent pas à l'expérience de RTE. CESI prend comme hypothèse un coût de 6 euros par kVAR. RTE considère que le coût serait plutôt de l'ordre de 8 euros par kVAR. De plus, la station de compensation devrait comporter des disjoncteurs sur les départs câble en plus du disjoncteur permettant d'enclencher l'inductance, pour permettre la mise en service du câble par tronçon. Cela augmenterait la surface de ces stations de compensation, ainsi que leur coût.

RTE estime donc que la valeur de 33 450 000 d'euros figurant au § 6.6.2 est sous-estimée, mais que le coût de la compensation pour une liaison à trois tricâbles serait plutôt de 88 millions d'euros, soit 55 millions d'euros de plus.

Quoi qu'il en soit, CESI confirme que l'exploitabilité et la fiabilité d'une telle liaison est incertaine. RTE qui a pour mission de garantir en permanence la sûreté de fonctionnement du réseau électrique, ne prendra pas un tel risque.

Le siphon

CESI a réalisé une étude d'ingénierie pour 30 km et 60 km de souterrain, soit un enfouissement partiel de la ligne Cotentin – Maine qui pourrait prendre la forme de trois tronçons de 10 ou 20 km.

La question du dimensionnement de la partie souterraine d'une liaison aérosouterraine est abordée au §6.1. Deux possibilités sont évoquées :

- un siphon à deux tricâbles :

« en effet, la configuration en double tri-câbles sur une longueur de 30 km permet de maintenir le lien synchronisant avec une fiabilité suffisante (on peut prévoir un défaut tous les 8 ans, d'une durée de 1 mois) ; la prise de charge de cette configuration n'est pas contraignante car elle se chiffre à 2 x 820 MVA, c'est à dire à un niveau compatible avec les conditions de pose les plus contraignantes. Il faut néanmoins remarquer qu'un double tri-câble connecté sur une ligne aérienne en double circuit, comporte en quelques sortes un goulot, même si elle répond aux spécifications de cette application particulière : en effet, la capacité de la ligne aérienne en double circuit étant d'environ 4000 MVA, la portée du tronçon de câble serait réduite à environ la moitié. Il faut remarquer que cette condition limite la flexibilité d'exploitation du gestionnaire de réseau » ;

- un siphon à quatre tricâbles :

« Afin d'éviter les contraintes d'exploitation liées au sous-dimensionnement du tronçon en câble par rapport à la ligne aérienne on peut envisager l'utilisation de 4 tri-câbles de 2000 ou 2500 mm² ».

Compte tenu, d'une part de l'utilisation de la ligne Cotentin – Maine comme maillage essentiel du réseau du nord-ouest de la France et de son rôle dans l'acheminement de l'énergie produite par le site de Flamanville qui totaliserait une production de 4200 MW –c'est à dire supérieure à la réserve primaire européenne, et d'autre part du risque de réduction de la capacité de transport des câbles souterrains liés à la sur-profondeur en cas de franchissement d'infrastructure ou de rivière, RTE considère que le dimensionnement à deux tricâbles n'est pas acceptable ni du point de vue de la capacité de transport, ni du point de vue de la disponibilité de l'ouvrage. C'est également ce que considère CESI dans la dernière page de son rapport, dans le tableau de comparaison des alternatives.

Selon le rapport de CESI, un ou plusieurs siphons de quatre tricâbles totalisant 30 km conduiraient à un coût d'investissement pour l'ensemble de la ligne de 230 millions d'euros (§ 6.7.1), contre 72 millions d'euros pour la ligne aérienne sur toute sa longueur. Ce surcoût d'investissement d'un facteur supérieur à 3 ne permet d'enfouir que 30 km, les 120 autres km du tracé restant en technique aérienne.

Du point de vue du coût sur le cycle de vie, le coût calculé par CESI est de 358 millions d'euros pour l'alternative composée de 30 km de câble souterrain et de 120 km de ligne aérienne, contre 200 millions d'euros pour la ligne aérienne seule.

Ce surcoût très important des siphons en 400 000 volts a conduit l'ensemble des gestionnaires de réseau de transport européens à en réserver l'usage pour les situations où des alternatives aériennes n'existent pas : passage sous la mer, alimentation du cœur de grandes agglomérations, zones limitées et remarquables... RTE considère que le cas du projet Cotentin – Maine n'est pas approprié pour l'utilisation de siphon à 400 000 volts.

L'alternative sous-marine

L'alternative du câble sous-marin n'a pas été présentée par RTE dans son dossier du maître d'ouvrage. L'étude réalisée par CESI et ses conclusions sont conformes à l'analyse que RTE a faite de cette alternative. On peut ajouter que, dans le cas d'une liaison vers la Bretagne, le lien synchronisant est insuffisant pour résoudre le problème technique posé par la mise en service de Flamanville 3.

RTE souhaite également compléter ce point de vue sur un aspect évoqué dans le cahier d'acteur qui a proposé cette alternative : le raccordement d'éoliennes off-shore à un câble sous-marin à 400 000 volts ne semble pas être une alternative adaptée au problème de la collecte de l'énergie produite par les éoliennes offshore, et son transport vers les zones de consommation. En effet, le niveau de tension de 400 000 volts serait une réponse coûteuse par rapport à des puissances produites par les éoliennes offshore qu'il serait probablement possible de transporter par des liaisons à 225 000 volts, voire de tension moindre.

Ensuite, la liaison sous-marine serait en fait une liaison à courant continu, ce qui nécessiterait d'ajouter un système de conversion alternatif – continu à l'endroit où les éoliennes offshore seraient raccordées à la liaison. Enfin, il convient de signaler que le raccordement à ces niveaux de tension doit être réalisé dans un poste électrique muni d'un appareillage coûteux et encombrant (disjoncteurs), ce qui nécessiterait de construire un poste électrique THT en pleine mer, sur une plate-forme, dont l'entretien et l'exploitation seraient extrêmement coûteux.

En résumé, si une liaison sous-marine était construite pour le groupe de production Flamanville 3, son utilisation conjointe pour la collecte de l'énergie produite par des éoliennes offshore ne serait pas un service à rendre à ces éoliennes car cela conduirait à des coûts et difficultés d'exploitation sans commune mesure avec des solutions plus classiques de câbles sous-marins plus courts, de niveau de tension plus faible, qui sont habituellement mises en œuvre pour des éoliennes offshore.