

SYNTHESE DE
L'ETUDE DE FAISABILITE TECHNICO-ECONOMIQUE
D'ALTERNATIVES A LA REALISATION
D'UNE LIGNE A TRES HAUTE TENSION
ENTRE LA FRANCE ET L'ESPAGNE

SOMMAIRE

Introduction	Page 3
1. Pourquoi une liaison à très haute tension entre la France et l'Espagne ?	Page 9
1.1. Le contexte électrique	Page 9
1.2. La vérification de la nécessité de construire une nouvelle liaison entre la France et l'Espagne	Page 12
1.3. Étude de la localisation de la nouvelle liaison dans l'ensemble des Pyrénées au regard du fonctionnement électrique du réseau	Page 13
1.4. L'alimentation de la ligne TGV : quelles synergies avec la liaison THT ?	Page 13
2. Comment une nouvelle liaison entre la France et l'Espagne : les différentes options technologiques	Page 15
2.1. Les lignes aériennes	Page 15
2.2. Les câbles à isolation synthétique – pose souterraine	Page 16
2.3. Les câbles à isolation gazeuse	Page 17
2.4. Les solutions sous-marines	Page 18
2.5. Les câbles supra-conducteurs	Page 19
3. Comment une nouvelle liaison entre la France et l'Espagne : les variantes d'insertion sur le terrain	Page 20
3.1. Les neuf configurations envisagées	Page 20
3.2. Les critères de comparaison	Page 22
3.3. L'alimentation de la ligne TGV	Page 24
3.4. Détail et comparaison des neuf configurations	Page 25
Configuration A	Page 25
Configuration B	Page 28
Configuration C	Page 29
Configuration D	Page 32
Configuration E	Page 34
Configuration F	Page 36
Configuration G	Page 38
Configuration H	Page 40
Configuration I	Page 42
Comparaison	Page 44
Glossaire	Page 45

INTRODUCTION

Avant-propos

À la demande du Préfet des Pyrénées-Orientales le cabinet italien Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano (CESI) qui a été sélectionné après une consultation internationale conduite par la DRIRE du Languedoc-Rousillon, a remis le 31 décembre 2002 une étude relative au projet d'interconnexion électrique à très haute tension entre la France et l'Espagne.

Indépendant, CESI est une société de services d'essais, de certification et de consultation reconnue internationalement regroupant près de 1050 personnes.

Le maître d'ouvrage, RTE, est en France le gestionnaire du réseau de transport d'électricité.

Cette étude de « faisabilité technico-économique d'alternatives à la réalisation d'une ligne à très haute tension entre la France et l'Espagne » a été commandée par le Préfet des Pyrénées-Orientales, suite aux réactions des élus lors de la concertation à laquelle il les avait conviés. La Commission Particulière du Débat Public a décidé de l'insérer dans le dossier du débat. Les lignes qui suivent, destinées à un très large public, en sont la synthèse.

Elle est complétée par une seconde étude CESI portant sur l'opportunité du point de vue électrique, de réaliser une telle liaison plutôt que le renforcement des autres lignes existant au travers des Pyrénées. Ce complément a été commandé par le Préfet à la suite de l'intervention de la Commission auprès de la Ministre Déléguée à l'Industrie. Pour des raisons matérielles, il fait l'objet d'un fascicule séparé, joint au dossier, et annoncé logiquement dans le présent rapport au paragraphe 1.3.

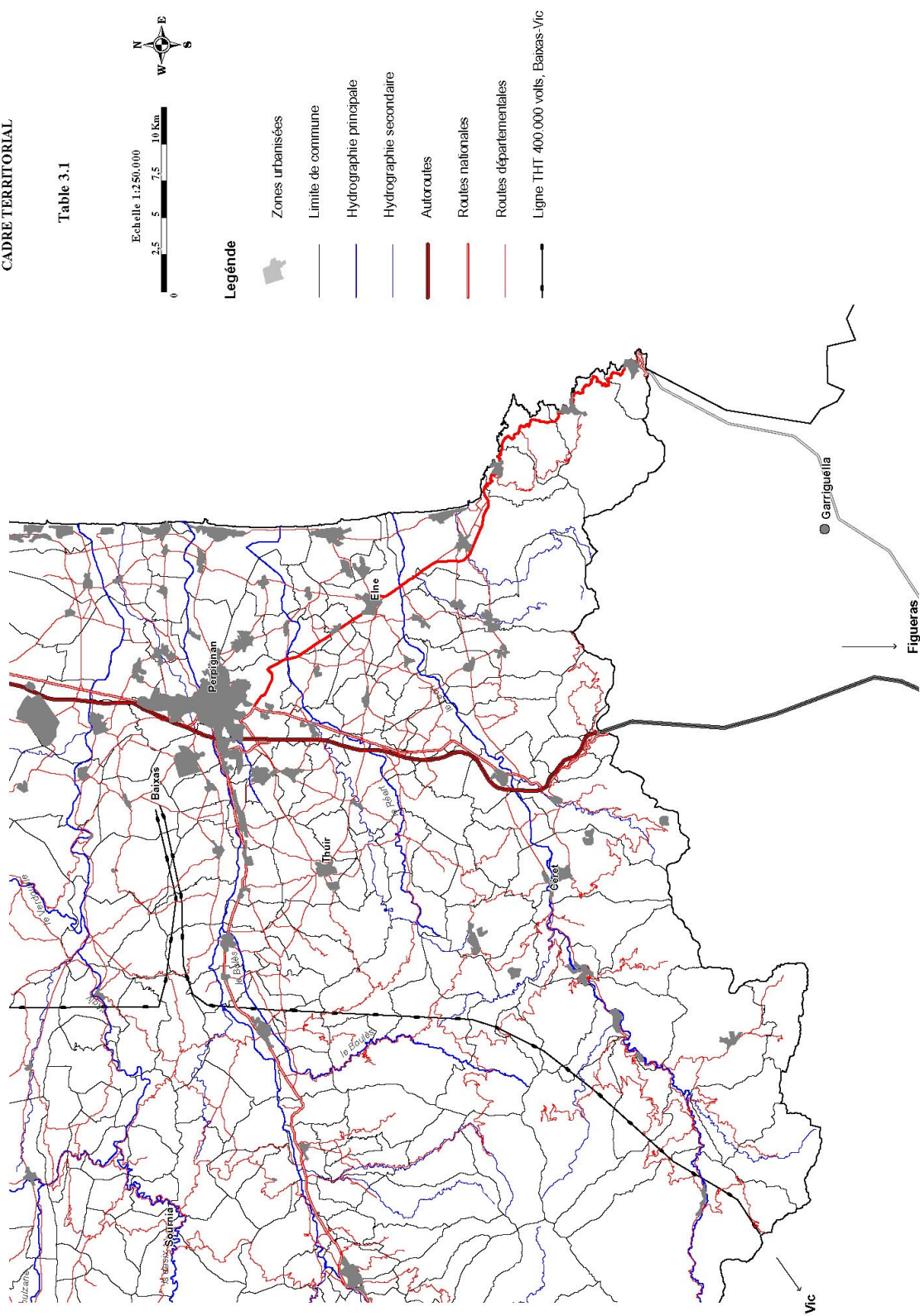
L'objectif de l'étude

L'étude doit permettre à l'ensemble des partenaires (élus, associations, milieux professionnels, etc.) de comprendre les enjeux de l'interconnexion des réseaux électriques entre la France et l'Espagne dans ses aspects techniques, économiques et environnementaux : elle ne prend pas pour point de départ le projet de RTE mais la problématique d'ensemble à laquelle ce projet est censé répondre.

La cartographie pour entrée en matière

- | | |
|--|--------|
| • carte du cadre territorial | page 4 |
| • carte du cadre morphologique | page 5 |
| • carte du type d'occupation du territoire : milieux humains | page 6 |
| • carte du type d'occupation du territoire : milieux naturels et semi-naturels | page 7 |
| • carte du milieu naturel et paysage | page 8 |

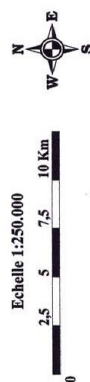
Table 3.1





TYPES D'OCCUPATION DU TERRITOIRE Milieux humains

Table 3.3a



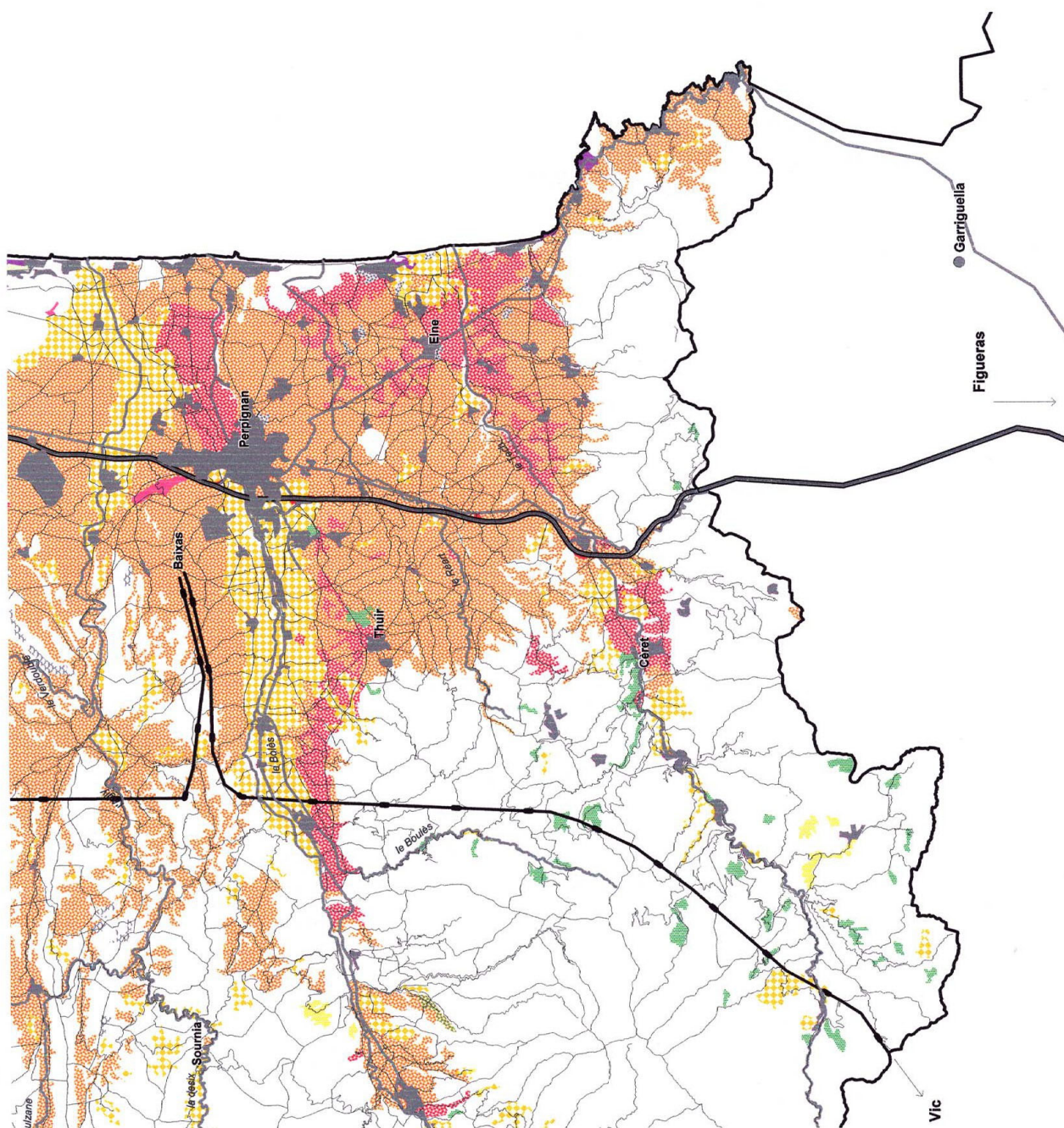
Legende

Territoires artificialisés

- Zones urbanisées
- Zones industrielles et commerciales
- Réseaux routier et ferroviaire
- Espaces verts urbains et sportifs
- Zones portuaires
- Aéroports
- Extraction de matériaux
- Décharges

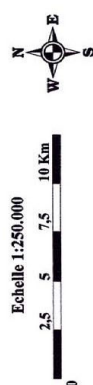
Territoires agricoles

- Terres arables
- Vignobles
- Vergeres et petits fruits
- Oliveraies
- Prairies
- Zones agricoles hétérogènes



TYPES D'OCCUPATION DU TERRITOIRE Milieux naturels et semi-naturels

Table 3.3b



Legende

Forêts et milieux semi-naturels



Zones humides



Surfaces en eau

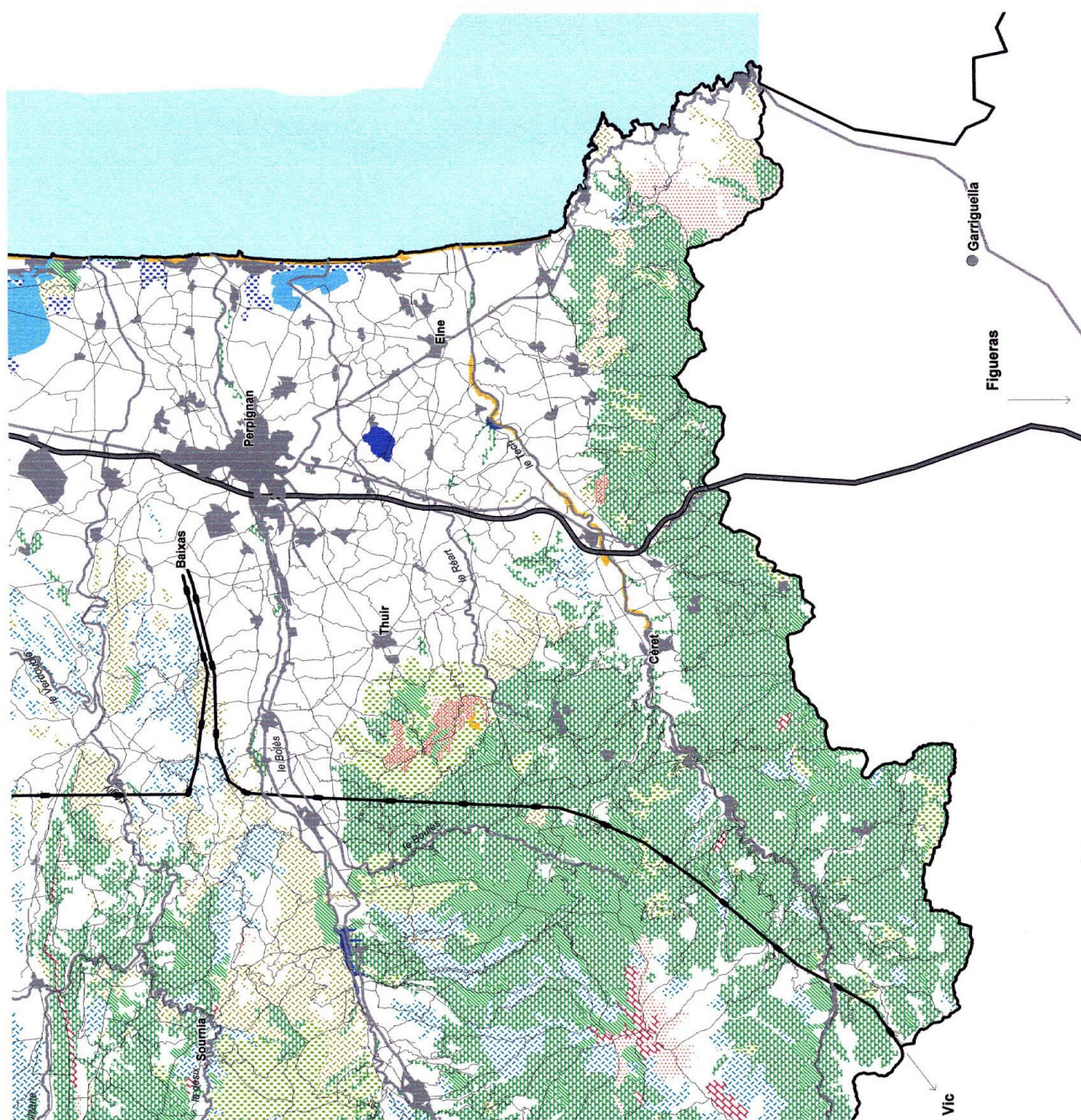
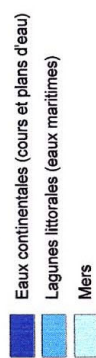
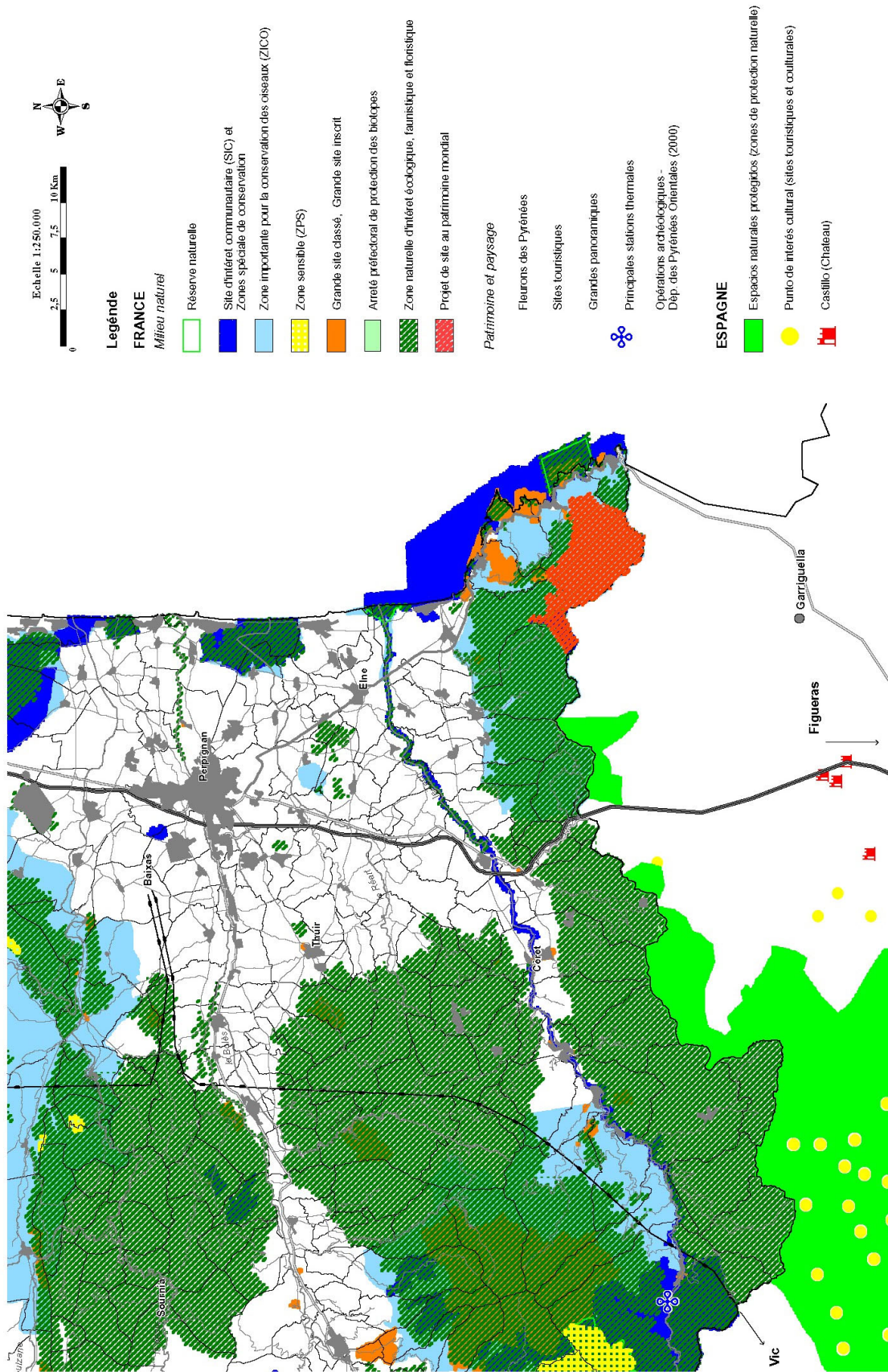


Table 3.4



1. POURQUOI UNE NOUVELLE LIAISON

À TRÈS HAUTE TENSION ENTRE LA FRANCE

ET L'ESPAGNE ?

1.1. Le contexte électrique

Évolution du rôle des interconnexions

Les réseaux électriques nationaux ou régionaux étaient à l'origine gérés en île, avec de très rares exceptions (comme par exemple le réseau interconnecté scandinave NORDEL). En Europe à partir des années 1950 on a commencé à interconnecter les réseaux pour en accroître les niveaux de fiabilité et de sécurité. Des règlements coordonnés de support mutuel dans les réseaux interconnectés furent adoptés au sein de l'UCTE (Union pour la Coordination du Transport de l'Électricité, cf. Glossaire page 45).

À partir des années 1970, les infrastructures transfrontalières furent de plus en plus exploitées pour profiter des différences de coûts de production de l'énergie entre les pays.

Enfin, suite à la libéralisation des marchés nationaux de l'électricité, les lignes d'interconnexion deviennent utiles pour promouvoir la création de marchés régionaux et continentaux. Leurs avantages sont reconnus dans le monde entier : à partir des années 1990 une série de projets bilatéraux et multilatéraux ont été lancés (par exemple, le partenariat Euro-Méditerranéen pour la création d'une aire méditerranéenne de libre-échange d'ici 2010).

Conditions requises pour la gestion d'un réseau en interconnexion

Les transactions d'énergie sont sujettes à des limitations techniques et commerciales. Celles-ci entraînent que les échanges possibles à travers les frontières sont nettement inférieurs à la capacité d'échange théorique des infrastructures. C'est le cas dans les pays du nord de l'Europe. Dans les pays du sud et de l'est méditerranéen, les limitations sont liées aux contraintes techniques dues aux infrastructures.

Les contraintes techniques sont liées aux facteurs suivants :

- Structures de transport :
 - Prise de charge non uniforme entre les lignes d'interconnexion (par exemple dans l'interconnexion entre l'Italie, la France et la Suisse les conditions de réseaux peuvent engendrer une prise de charge non uniforme entre les lignes)
 - Possibilité d'avoir des flux parallèles ou des circulations d'énergie (par exemple, l'échange d'énergie entre les pays de la seconde zone synchrone de l'UCTE donne souvent origine à des flux parallèles) ;
 - Les raisons de sécurité d'exploitation (par exemple, la mise en œuvre de critères de sécurité N-1 ou parfois N-2) ;
- Manque de structures de communication, protection et contrôle.

Échanges d'énergie entre la France et l'Espagne

Les échanges d'énergie entre la France et l'Espagne sont encore modérés (approximativement 7TWh/an¹). Ils devraient atteindre 9TWh/an en 2005 et 19TWh/an en 2010 si une partie de l'énergie nécessaire à l'Espagne est importée d'Algérie grâce à la ligne en projet entre ces deux pays.

Les infrastructures actuelles représentent un goulet d'étranglement qui empêche une gestion optimale du réseau interconnecté, et tient l'Espagne à un taux d'interconnexion assez réduit (0.26) par rapport à d'autres pays (Allemagne 0.75 ; Suisse 2.56).

Cela empêche l'intégration de la péninsule Ibérique dans le marché continental de l'électricité. La Commission européenne estime que le niveau d'interconnexion (cf. Glossaire page 45) devrait être d'au moins 10 % de la puissance installée dans chaque pays membre et que cet objectif devrait être atteint en un temps raisonnable. L'U.E. propose de passer de 10 % à 20 % le taux maximum de co-financement des projets prioritaires, dont le renforcement des interconnexions entre France, Espagne et Portugal font partie.

Lignes d'interconnexion entre la France et l'Espagne

La France et l'Espagne sont actuellement interconnectées au travers de quatre lignes à haute ou très haute tension, comme décrit dans le tableau ci-dessous.

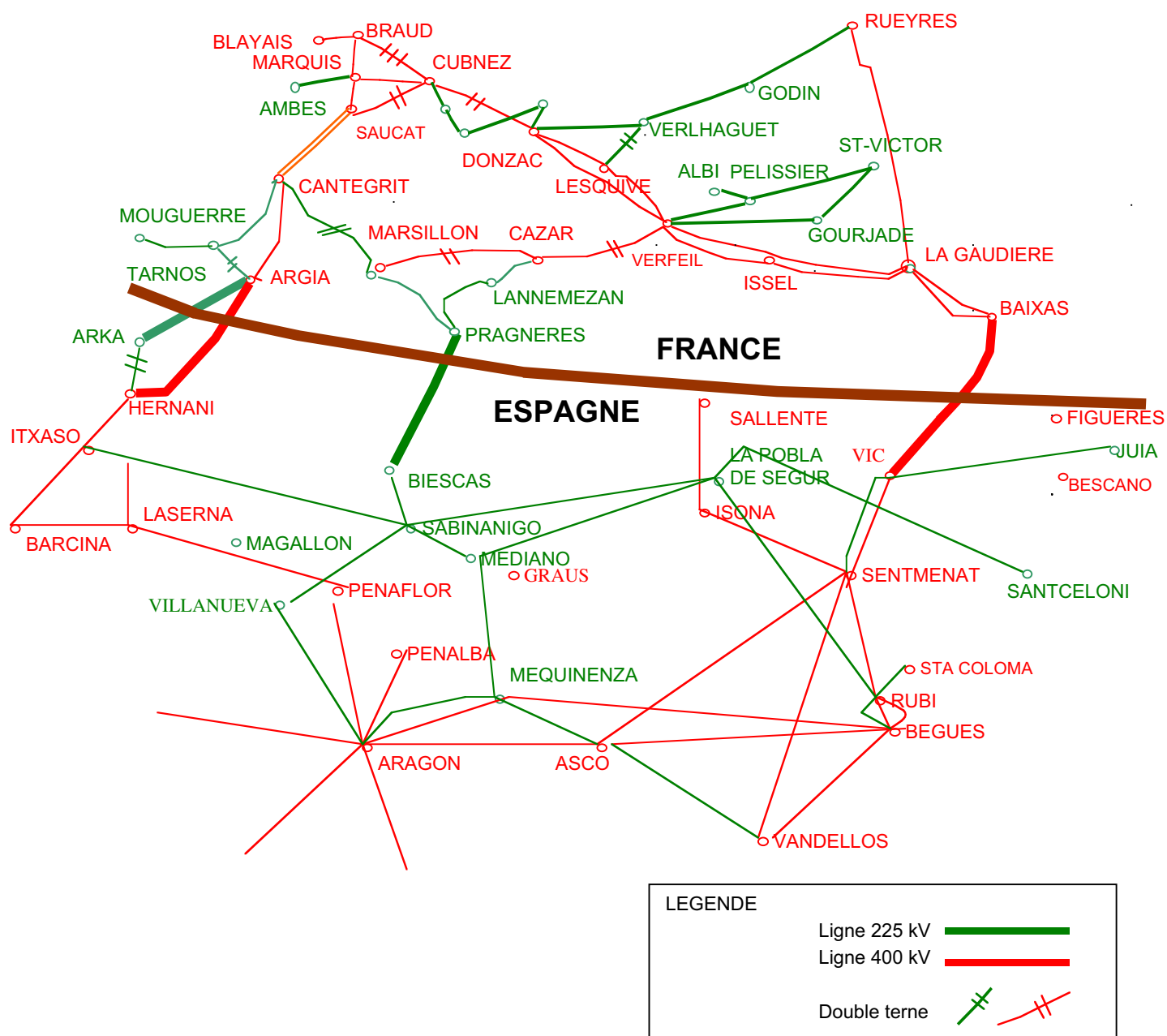
Poste de départ	Poste d'arrivée	Tension (kV) ²	Longueur (km)	Limite d'été (MVA) ³		Limite d'hiver (MVA)	
				Conditions de régime	Conditions d'urgence	Conditions de régime	Conditions d'urgence
Argia	Hernani	400	50	1360	1530	1540	1700
Argia	Arkale	225	37	400	400	460	460
Biescas	Pragnères	225	48	280	340	280	340
Baixas	Vic	400	110	1450	1450	1610	1610

Malgré la présence de quatre lignes d'interconnexion, le NTC (Net Transfert Capacity, cf. Glossaire page 45) entre les pays est d'environ 1100MW en été et 1400MW en hiver. Ces limites ont été calculées en considérant le critère de sécurité N-1 et N-2 en cas de double tene (cf. Glossaire page 45) sur le même poteau. De plus, les marges de sécurité tiennent compte de la présence d'un PST (Phase Shifter Transformer) de 300 MVA installé dans le poste de Pragnères. Ce PST est normalement géré avec un $\alpha=0^\circ$, mais peut dans le cas de surcharges arriver jusqu'à $\alpha=50^\circ$.

¹ TWh : TeraWattheure

² kV : kiloVolt

³ MVA : Millions Volt Ampère



Réseau RTE pris en compte dans la simulation de réseau

1.2. La vérification de la nécessité de construire une nouvelle liaison entre la France et l'Espagne

Une analyse statique du réseau franco-espagnol a été conduite afin de vérifier la possibilité d'augmenter la capacité nette d'échange entre les deux pays en tenant compte des contraintes de fonctionnement de réseau, tant en conditions normales qu'en fonctionnement d'urgence. Cette capacité devrait passer de 1100-1400MW (été – hiver) à 2800MW (valeur minimale garantie en chaque saison). On veut vérifier s'il est nécessaire pour atteindre cet objectif de renforcer l'interconnexion France-Espagne sur la directrice méditerranéenne à partir de Baixas (vers Bescanò, Vic ou Figueres).

Critères de sécurité

Les critères de sécurité qui doivent être pris en compte dans l'évaluation d'une interconnexion internationale sont les suivants :

- pour les lignes de transport, la possibilité de défaut d'une ligne sans conséquence sur le fonctionnement des autres (le niveau de charge des autres lignes ne dépassant pas les capacités de transport dimensionnelles des lignes),
- le niveau de charge des composants des postes,
- les niveaux de tensions minimum et maximum admises dans les postes.

Résultats obtenus

La simulation du comportement des réseaux français et espagnol dans leur structure actuelle a été effectuée en tenant compte du scénario prévu pour l'année 2006 en situation de crête d'hiver.

- Dans des conditions normales pour un transit de puissance transfrontalière de 2 800 MW, on constate une légère surcharge de la ligne 225 kV Pragnères-Biescas.
- Dans l'hypothèse de la mise hors tension accidentelle de la ligne 225 kV Argia-Arkale, une surcharge se développe dans la ligne 225 kV Pragnères-Biescas.
- Dans l'hypothèse de la mise hors tension accidentelle de la ligne 225 kV Pragnères-Biescas, une surcharge se développe dans la ligne 400kV Baixas-Vic.
- Dans l'hypothèse de la mise hors tension accidentelle de la ligne 400 kV Argia-Hernani, toutes les lignes se surchargent au-delà des limites admissibles par les critères de sécurité établis.
- Dans l'hypothèse de la mise hors tension accidentelle de la ligne Baixas-Vic, la surcharge des lignes devient intolérable et on assisterait à un effondrement du réseau.

En d'autres termes, cette simulation montre qu'un accident intervenant sur l'une des liaisons se traduit dans les deux derniers cas par un transfert de charge sur les autres lignes trop important pour le bon fonctionnement du réseau.

Tous les calculs de charge selon toutes les hypothèses aboutissent donc à la nécessité absolue de construire une nouvelle ligne pour garantir le fonctionnement des réseaux français et espagnol suivant les critères de sécurité imposés par l'UCTE.

1.3. Étude de la localisation de la nouvelle liaison dans l'ensemble des Pyrénées au regard du fonctionnement électrique du réseau

L'étude de la localisation de la nouvelle liaison, au regard des seules considérations électriques a été demandée début janvier 2003, suite de l'intervention du Président de la Commission Particulière du Débat Public auprès de Mme la Ministre Déléguée à l'Industrie.

Les résultats en seront connus avant l'ouverture du débat public mais ne peuvent, pour des questions de délais d'impression, être intégrés à la présente synthèse.

Ils feront l'objet d'un fascicule à part venant compléter le dossier du débat.

1.4. L'alimentation de la ligne TGV : quelles synergies avec la ligne THT ?

Le but de ce chapitre est de répondre à la question de savoir si la ligne électrique THT est nécessaire au fonctionnement de la ligne TGV. L'étude en a été faite de manière très complète. Elle est retracée *in extenso* dans le rapport, dont voici le résumé.

Une nouvelle ligne ferroviaire à grande vitesse est prévue entre les villes de Perpignan et de Figueres en Espagne. Cet ouvrage en phase avancée de projet requiert une alimentation électrique adéquate. Dans certaines conditions, la puissance nécessaire pourrait être prélevée à partir de la ligne d'interconnexion, objet de l'étude.

Actuellement, la SNCF utilise le réseau national de transport d'électricité (RTE) pour alimenter les postes de traction électrique. L'alimentation des caténaires des lignes TGV est obtenue par la transformation de la haute tension du réseau triphasé RTE en une tension de 25kV biphasés. Le prélèvement d'une tension entre deux phases d'un système triphasé peut engendrer des dérangements sur le réseau qui peuvent s'avérer intolérables : ces dérangements sont appelés « taux de déséquilibre ».

Afin de comprendre l'influence de l'alimentation de la ligne TGV sur le comportement des réseaux français et espagnol, différents scénarios ont été étudiés.

Sur la structure du réseau :

- Structure n°1

Situation de réseau actuelle : absence de la ligne d'interconnexion 400kV Baixas-Bescanò, aucun renforcement des réseaux 400 kV ou 225 kV français et espagnol.

- Structure n°2

Situation de réseau renforcé tant du côté français qu'espagnol : présence de la ligne 400kV Baixas-Bescanò et des lignes de renforcement prévues sur le réseau espagnol.

Sur la tension d'alimentation du poste TGV :

- ⇒ 400 kV : la ligne TGV serait alimentée au moyen d'une seule transformation 400/25 kV
- ⇒ 225 kV : la ligne TGV serait alimentée au moyen de deux transformations, 400/225 kV et 225/25 kV
- ⇒ 90 kV : la ligne TGV serait alimentée au moyen de deux transformations, 400/90 kV et 90/25 kV
- ⇒ 63 kV : ce cas n'est pratiquement pas réalisable en raison des caractéristiques du poste de Baixas

Sur la configuration de poste :

- Alimentation de la ligne TGV au moyen de transformateurs 300 MVA et 600 MVA

Pour chacun des scénarios, la puissance maximale (Pmax) prélevable en régime permanent a été calculée en respectant les contraintes de déséquilibre maximum admissible. Ce calcul a tenu compte de deux possibilités de gestion : l'utilisation de transformateurs dédiés (D) ou non (ND) à l'alimentation du TGV.

Résultats obtenus

Coté	Structure	V	Pmax (ND)	Pmax (D)
France (Baixas)	1	400	24	92
France (Baixas)	2	400	26	125
France (Baixas)	1	225 (300)	27	88
France (Baixas)	2	225 (300)	28	120
France (Baixas)	1	225 (600)	45	88
France (Baixas)	2	225 (600)	49	120
Espagne (Juia)	1	220	26	-
Espagne (Juia)	2	220	48	-

Ce tableau montre que :

- Coté français, le réseau actuel a les caractéristiques suffisantes pour alimenter la ligne à grande vitesse.

L'utilisation de transformateurs dédiés à l'alimentation du TGV est une mesure bien plus efficace que le renforcement de l'interconnexion France-Espagne. Néanmoins, il est évident que le renforcement du réseau permettrait d'augmenter les marges de sécurité de l'alimentation du TGV. La synergie de la réalisation des ouvrages se trouverait ainsi confirmée.

- Coté espagnol, le réseau actuel n'a pas les caractéristiques suffisantes pour alimenter la ligne à grande vitesse.

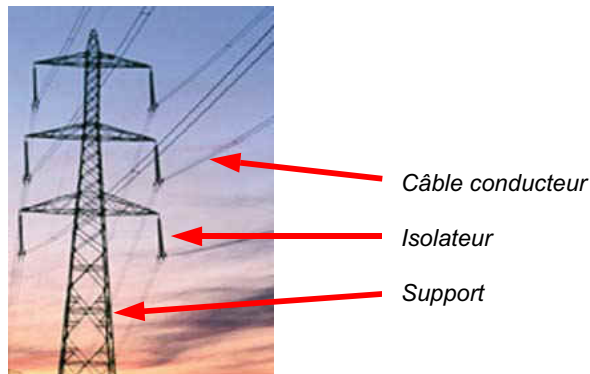
Même s'il est possible que des travaux supplémentaires sur le réseau espagnol permettraient cette alimentation, le renforcement de l'interconnexion franco-espagnole est important pour l'alimentation de la ligne TGV.

Même si elle n'est pas strictement nécessaire à cet objectif, la construction de l'interconnexion Baixas-Bescanò permettrait d'augmenter la disponibilité de puissance et augmenterait les marges de sécurité .

2. COMMENT UNE LIAISON À TRÈS HAUTE TENSION : **LES DIFFÉRENTES OPTIONS TECHNOLOGIQUES**

2.1. Les lignes aériennes

Les lignes électriques aériennes sont l'élément de liaison entre deux points généralement éloignés, les sites de production de l'énergie et les lieux de consommation. Elles se composent de supports, d'isolateurs et de câbles conducteurs.



Les lignes aériennes peuvent prendre plusieurs options : les tracés alternatifs, les lignes en simple ou double terre.

Le dimensionnement des composants électriques prend en compte l'influence du milieu dans lequel il s'insère en termes de résistance mécanique et de pollution pour la dégradation de la tenue diélectrique des isolateurs.

La sécurité des lignes du point de vue électrique est assurée par l'intervention automatique et rapide (fraction de seconde) des dispositifs automatiques d'interruption. Leur rôle : mettre la ligne hors tension en cas d'anomalie de type court-circuit, mise à la terre à cause d'arbres, foudre, etc.

Construction

Le chantier est généralement constitué d'un camp de base et de mini-chantiers aux emplacements de chaque support.

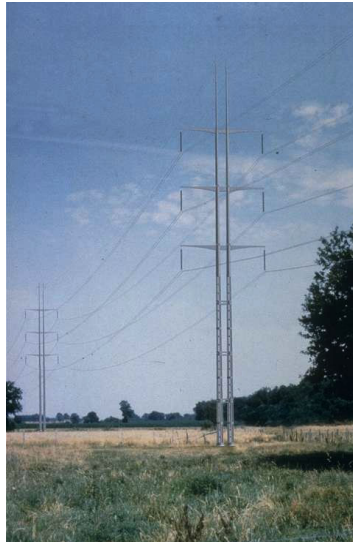
Six mois sont nécessaires à la réalisation des fondations d'un support de 400 kV. Les dérangements locaux sont dus aux opérations de creusement par pelles mécaniques, de transport et de coulage du béton. Un mois après les fondations, les structures des différents supports sont réalisées. Le montage d'un support au moyen de grues requiert deux à cinq jours.

Le déroulage des câbles s'effectue en tronçons de cinq à six kilomètres à la fois et dure un mois pour chaque tronçon.

En montagne, les moyens, les durées et les impacts transitoires peuvent être plus importants mais interfèrent moins sur la population.

Environnement

C'est évidemment en cas de lignes aériennes que l'impact visuel est le plus important. Pour le réduire dans toute la mesure du possible, il faut être très attentif aux lieux d'implantation et à la hauteur des pylônes, au calibre des câbles, à la possibilité d'utiliser la géographie du territoire concerné pour atténuer la visibilité de la ligne.



Support « Roseau »

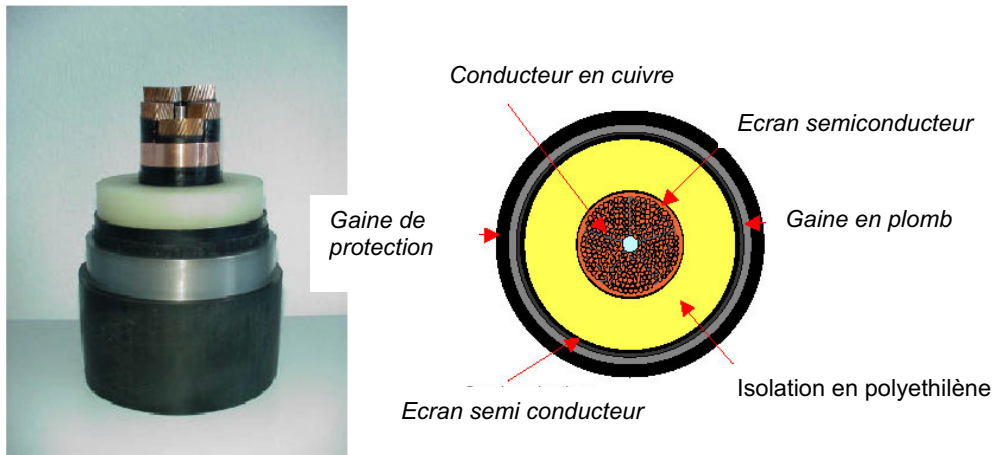
2.2. Les câbles à isolation synthétique – pose souterraine

Les câbles à isolation synthétique en polyéthylène réticulé constituent la technologie la plus avancée pour l'enfouissement des câbles à très haute tension.

Une ligne en câble est constituée de la partie en câble proprement dite et des accessoires : bornes et jonctions. Les bornes raccordent les câbles au réseau électrique.

Pour des raisons d'encombrement sur les routes au moment de leur transport par camions spéciaux, la dimension des câbles, enroulés sur bobines, est comprise entre 500 et 1000 mètres. Pour obtenir les longueurs voulues, il faut établir des jonctions.

Dans le câble à isolation synthétique, le conducteur est en cuivre. Le câble comprend aussi un écran semi conducteur interne, et externe, des enveloppes isolantes semi-conductrices et enfin, une gaine isolante externe de protection pour les tiers.



Les câbles sont posés dans une tranchée sur une semelle dure puis recouverts de sable spécial à basse résistance thermique ou de ciment maigre. Il existe trois possibilités de pose des câbles à isolation synthétique à très haute tension : en tunnel, en fourreaux avec disposition en trèfle, en fourreaux avec disposition plane.

Cette technique a été mise en œuvre par exemple :

- à Berlin (ligne de 400 kV sur une longueur de 6,3 km),
- à Copenhague (deux lignes de 975 MW, de 21 et 10 km respectivement),
- au Japon (ligne de 90 MW sur une longueur de 40 km).

Environnement

La quantité de terre excavée pour l'enfouissement conduit à prévoir des aires de dépôt. À titre informatif, 40 km de ligne représentent un volume de 1.150.000 m³.

Lors de l'excavation, la présence de poussière peut impacter les zones de viticulture et de potagers. Comme pour toute réalisation enfouie dans le sol, une attention particulière devra être portée aux risques d'impact sur l'environnement hydrogéologique et à la possibilité non négligeable de découverte archéologique, ce qui comportera un ralentissement des travaux de pose, sinon, une déviation du tracé.

Dans le cas de pose en fourreaux, une fois la construction achevée, le terrain occupé représente une bande de 17 m de largeur ou deux couloirs d'environ 7 m chacun en bordure d'une route de service large de 3 m ; dans le cas des câbles posés en tunnel, par contre, l'emprise a une largeur d'environ 4 m de largeur sur une profondeur de moins de 3 m.

2.3. Les câbles à isolation gazeuse

Les câbles à isolation gazeuse (CIG) sont essentiellement des tubes métalliques contenant des conducteurs soutenus par des isolateurs de support. L'isolation est assurée par un gaz ou un mélange sous pression.

Les CIG permettent une valeur élevée de puissance unitaire transportable de 1500 à 6000 MW qui autorise la réduction du nombre de lignes parallèles ; en outre, cette technologie permet potentiellement des longueurs très importantes (jusqu'à 100 km) sans aucune nécessité de compensation du réactif ; cet atout n'est pas encore utilisé en pratique car les connexions existantes dans le monde ont des longueurs moindres. Pour réduire l'impact

visuel, les CIG s'enfouissent. Enfin, ils présentent un niveau pratiquement nul de champs électriques et fortement réduit pour les champs magnétiques par rapport aux autres technologies. Utilisées depuis 20 ans, surtout au Japon, peu de connexions dépassent aujourd'hui les 500 m de longueur : à quelques exceptions près, la fonction principale des CIG est le raccordement interne entre postes à haute tension et non la liaison pour la transmission sur longues distances. Les coûts de réalisation sont en effet dix fois supérieurs à ceux d'une ligne aérienne classique.

Les principales réalisations sont à l'heure actuelle au nombre de 150, dont une seule en France (à Chinon).

Environnement

Le gaz utilisé est un excellent isolant, non toxique, non inflammable et chimiquement inerte mais il présente un effet de serre puissant et une des persistances les plus longues dans l'atmosphère ; ceci est à prendre en compte pour les pertes naturelles de gaz dues à la présence de jonctions et de soudures qui peuvent compromettre l'étanchéité parfaite de l'enveloppe et les éventuels accidents pendant le cycle de vie de la connexion avec des fuites potentielles de gaz.

Cette solution occupe, une fois terminée, une bande de terrain équivalente à celle des câbles à isolation synthétique en pose fourreaux.

2.4. Les solutions sous-marines

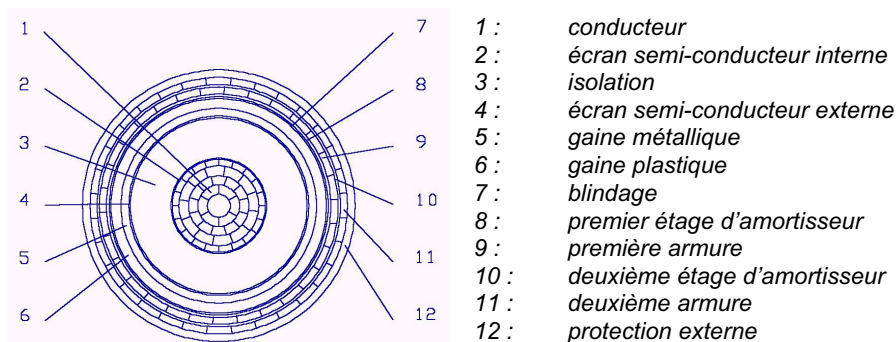
Le passage d'une ligne d'interconnexion à très haute tension par la mer peut se faire selon deux techniques : en tension alternative ou continue. Pour des raisons de pertes capacitives non compensables au-delà d'une longueur de 50 km, l'analyse des cartes géographiques concernées conduit à ne retenir que la technologie en tension continue pour la solution sous-marine (HVDC).

Une connexion en tension continue est constituée d'un poste de conversion de départ où s'opère la conversion de la tension alternative en continue, d'un câble de connexion et d'un poste de conversion d'arrivée ou se réalise la transformation de la tension continue en alternative.

Une connexion de retour est nécessaire pour fermer le circuit et donc permettre le flux de courant. Dans les installations de petite envergure, cette connexion peut être assurée par l'eau de mer grâce à l'utilisation d'électrodes situées à chaque extrémité de la connexion ; dans les installations plus importantes le retour du courant se fait au travers d'une installation jumelle à celle de l'envoi de courant (ce type d'installation est dit « bipolaire ») et donc grâce à un câble, en évitant la circulation de courant dans l'eau de mer.

Les câbles pour application en tension continue sont de deux types : à isolation en huile fluide ou à isolation solide mixte en papier polyéthylène.

Dans les systèmes HVDC, les électrodes qui assurent la fermeture du circuit peuvent être « de terre », « sur côte », « en mer ». Ces dernières, à plus de 100 m des côtes, sont placées en profondeur.



Structure interne du câble sous-marin utilisé dans la connexion Italie-Grèce

Environnement

En termes d'occupation de terrain, la surface de poste pour un tel projet serait de l'ordre de 120 000 m².

Dans le cas de l'utilisation d'électrodes de retour de courant, dans une zone comprise entre cinq mètres des électrodes, les champs électriques peuvent engendrer des effets négatifs sur les organismes marins. Les produits de l'électrolyse (essentiellement du chlore) sont potentiellement toxiques. La toxicité varie sensiblement en fonction de l'espèce marine considérée.

Les champs électromagnétiques créés par les câbles sous-marins peuvent avoir des effets sur les boussoles des bateaux et leurs systèmes de guidage.

Enfin, si aucun impact visuel autre que celui des postes n'est à déplorer, il n'en reste pas moins que cette technologie s'accompagne d'effets négatifs sur l'environnement, dus en particulier aux champs magnétiques, aux produits de l'électrolyse et à la génération de chaleur.

2.5. Les câbles supraconducteurs

Le développement de conducteurs à base de matériaux céramiques supraconducteurs dits « à haute température » (en réalité les températures de fonctionnement sont de l'ordre de -200°C !) a permis la réalisation de prototypes de câbles supraconducteurs refroidis à l'azote liquide. Potentiellement, ils peuvent être utilisés dans les réseaux de puissance pour le transport de l'énergie électrique, mais le recours à cette solution pour la réalisation de la liaison France-Espagne est à la limite de la technologie.

Il convient de préciser qu'à l'heure actuelle, le câble supraconducteur ne peut en aucune mesure être compétitif par rapport aux autres technologies, ni pour les aspects techniques, ni pour les aspects économiques.

3. COMMENT UNE LIAISON À TRÈS HAUTE TENSION : **LES VARIANTES D'INSERTION SUR LE TERRAIN**

L'analyse des solutions technologiques pour la ligne à très haute tension entre la France et l'Espagne a conduit CESI à formuler neuf configurations possibles de ligne. Elles sont représentées page suivante.

3.1. Les neuf configurations envisagées

Lignes aériennes longeant le TGV

- **Configuration A** : Ligne aérienne en double terre entre Baixas et Bescanò sur le parcours le plus court, le long de la ligne du TGV.
- **Configuration B** : Ligne aérienne en double terre entre Baixas et Bescanò sur un parcours alternatif qui évite les zones plus densément peuplées.

Ligne aérienne

- **Configuration C** : Ligne aérienne en renforcement de la ligne existante Baixas-Vic, ligne en simple terre le long de la portion où la ligne Baixas-Vic est en double terre et ligne en double terre à partir du point où la ligne Baixas-Vic est en simple terre.
- **Configuration D** : Ligne aérienne en renforcement de la ligne existante Baixas-Vic avec une structure qui prévoit un poteau séparé pour chaque terre (ligne en simple terre).

Câbles souterrains longeant le TGV

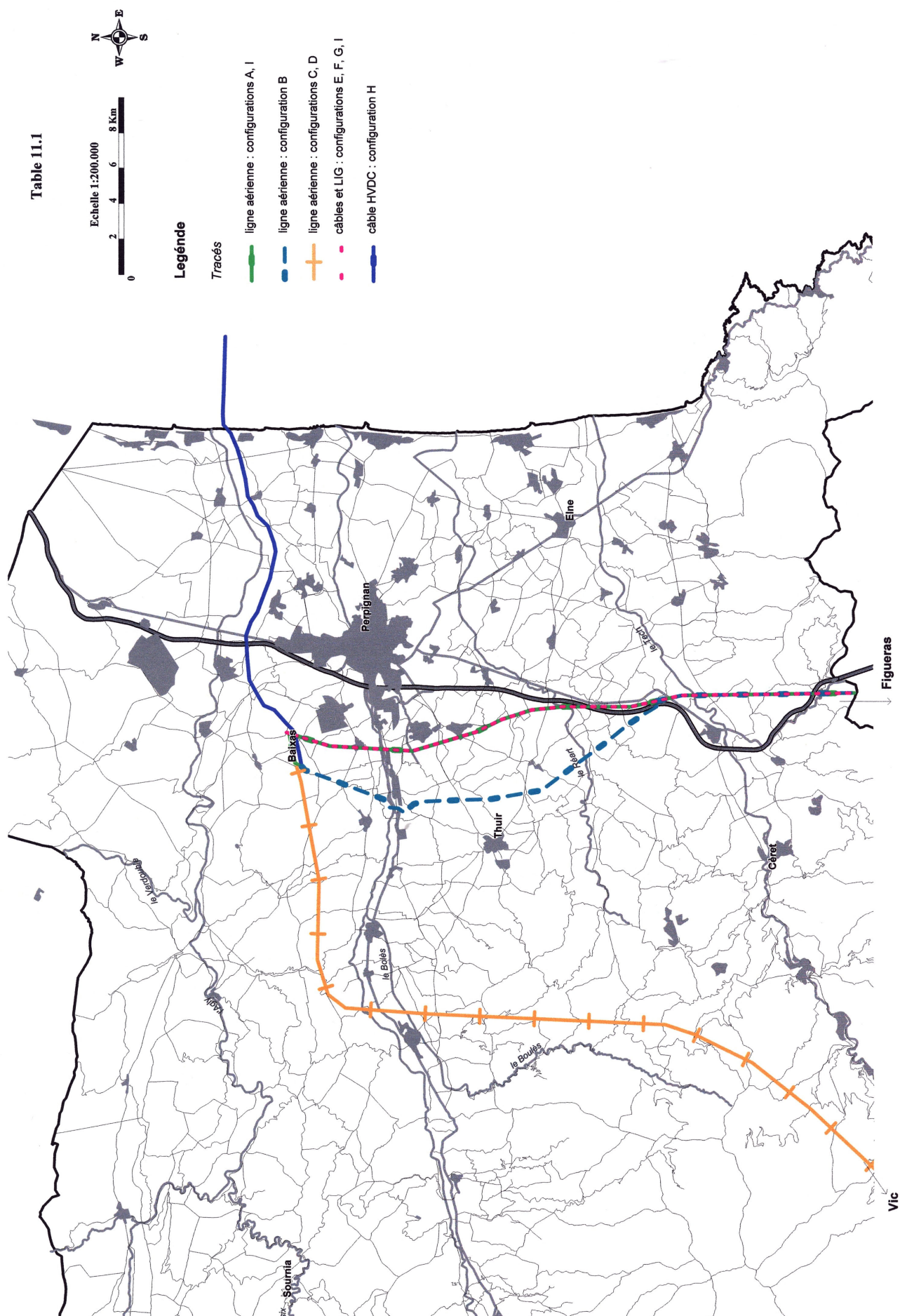
- **Configuration E** : Ligne en câble souterrain à isolation synthétique entre Baixas et Bescanò avec pose en tunnel.
- **Configuration F** : Ligne en câble souterrain à isolation synthétique entre Baixas et Bescanò avec pose en fourreaux et disposition en trèfle.
- **Configuration G** : Ligne en câble à isolation gazeuse entre Baixas et Bescanò avec pose directement enterrée.

Câble sous-marin par l'Agly

- **Configuration H** : Ligne en câble souterrain + câble sous-marin entre Baixas et Figueres alimentée en tension continue.

Liaison mixte aérien-souterrain longeant le TGV

- **Configuration I** : Ligne mixte aéro-souterraine entre Baixas et Bescanò prévoyant des tronçons en câble souterrains dans les endroits les plus densément peuplés.



3.2. Les critères de comparaison

La comparaison des différentes alternatives technologiques peut être effectuée suivant différents critères qui prennent en compte les avantages et inconvénients de chaque solution alternative dans les divers domaines (technique, environnemental, économique) ; les critères de comparaison que CESI préconise sont les suivants :

- **Critères techniques :**

- **«Longueur de la connexion** » : les différentes alternatives prises en compte ont en effet des longueurs qui peuvent différer les unes des autres ;
- **«Expérience précédente** » : certaines des solutions prises en compte ont un degré d'innovation très élevé ; dans certains cas, aucune application d'une envergure similaire à celle considérée dans cette étude n'a encore été exécutée en France ou dans le monde ; ce critère permet de mesurer le « risque technologique » de l'application d'une solution ;
- **«Fiabilité de la technologie** » : le nombre de défauts par unité de longueur qui est intrinsèque à la technologie prise en compte, lié à la sensibilité aux conditions atmosphériques, aux techniques de construction, au suivi que les utilisateurs déclarent au niveau international ;
- **«Redondance de la configuration** » : certaines configurations sont composées de différentes connexions en parallèle : la perte d'une connexion peut donc avoir des effets différents selon le nombre de connexions restantes ;
- **«Surcharge d'autres lignes en cas de problème** » : la ligne qui fait l'objet de l'étude doit être vue dans l'ensemble du réseau : les différents modes de défaut de la ligne peuvent se répercuter sur le niveau de charge des autres lignes et affecter localement ou globalement le réseau français ou espagnol, en termes de surcharge des autres lignes d'interconnexion ;
- **«Niveau de difficultés techniques de construction de la ligne** » pour la construction : la nécessité d'utiliser des moyens spéciaux pour la construction (hélicoptères, systèmes sophistiqués de creusage, moyens de pose non conventionnels, etc.) ;
- **«Durée du chantier** » : qui est un indice pour évaluer les perturbations que la réalisation de la ligne fait supporter à la population locale ;
- **«Complexité des opérations de maintenance** » dans le courant de la vie de service : en termes de nécessité de surveillance des conditions, de possibilité d'effectuer un monitoring des conditions des composants sans déplacement de personnel, de nécessité d'agir de temps en temps pour effectuer des opérations de nettoyage, de conservation ou de protection des composants ;
- **«Aspects liés à l'alimentation de la ligne TGV** » : certaines configurations s'éloignent du tracé de la ligne TGV et l'alimentation de cet ouvrage doit se faire en réalisant d'autres structures.

- **Critères environnementaux :**

- **«Impact visuel** » : la présence de la ligne peut modifier l'aspect du territoire, masquer des sites panoramiques, constituer un dérangement pour le tourisme etc ;
- **«Champs électromagnétiques** » : les différentes technologies prises en compte sont caractérisées par des niveaux différents de champs électriques et magnétiques ; ce critère tient compte de cet aspect ;
- **«Occupation du terrain en phase de construction** » : le chantier de construction peut s'étendre (en longueur ou en largeur) sur des aires importantes de territoire et empêcher ou déranger les activités qui s'y opèrent ;

- **«Occupation permanente du terrain »** : une fois que la ligne est mise en service, certaines zones ne sont plus utilisables pour les activités humaines (par exemple, on ne peut pas planter d'arbres sur les fourreaux d'un câble, on ne peut pas construire en altitude sous une ligne aérienne, etc.) : ce paramètre tient compte de ce dérangement qui se prolonge sur toute la durée de vie de la ligne ;
- **«Impacts sur la faune et la flore »** : certaines technologies ont un impact important sur l'avifaune (obstacles à la migration des oiseaux), tandis que d'autres impactent plus le sol ou le sous-sol ;
- **«Interférences hydrogéologiques »** : on évalue l'influence de l'utilisation d'une technologie sur l'écoulement des eaux et sur les caractéristiques des eaux de surface et profondes locales ;
- **«Interactions avec les zones protégées, les sites archéologiques, les parcs naturels »** : les technologies et les configurations sont comparées par rapport à leur possible influence sur le patrimoine historique ou naturel local.
- **Critères économiques :**
 - **«Coût de réalisation de l'ouvrage »** : on y compare les investissements qui doivent être effectués pour réaliser les différents types de lignes prises en compte ;
 - **«Niveau de pertes »** caractéristique de la technologie : c'est-à-dire l'énergie qui est perdue le long de la connexion et les coûts annexés à ces pertes, qui font partie des coûts de gestion de la ligne ;
 - **«Coût de dé-fabrication en fin de vie »** : on y compare les coûts actualisés pour reconstituer le territoire dans l'état d'avant la construction de la ligne ;
 - **«Indemnités et mesures d'accompagnement »** : selon le type de solution adoptée sont prévues des indemnités aux riverains (pour les servitudes, la réparation des dommages causés par les travaux, l'indemnisation des propriétaires de terres agricoles ou de bois, des propriétaires des maisons proches) et aux collectivités locales (taxes et mesures de compensation : enfouissement de lignes aériennes, mesures d'accompagnement : contribution au Fond d'aménagement des réseaux, participation au programme local pour l'environnement et l'emploi, etc.).

Pour chacune des alternatives étudiées est reporté un tableau qualitatif (cf. page 44) qui, grâce à un code couleurs, permet de situer la solution par rapport aux autres vis-à-vis de chacun des critères adoptés.

Vert foncé	Très favorable
Vert clair	Favorable
Jaune	Moyen
Orange	Critique
Rouge	Très critique

En accord avec son commanditaire, CESI ne reporte dans son rapport aucune pondération entre les critères de comparaison.

3.3. L'alimentation de la ligne TGV

Dans tous les cas de figures d'interconnexion étudiés, l'alimentation de la ligne TGV se ramène à celui de la configuration A ou à celui de la configuration C.

- Les configurations B, E, F, G, I prévoient une alimentation de la ligne ferroviaire identique à la configuration A.
- Les configurations D et H présentent une alimentation de la ligne ferroviaire identique à la configuration C.

Option TGV dans la configuration A

L'alimentation de la ligne TGV est théoriquement possible tout le long du tracé. Cette solution technique répond au cahier des charges SNCF en termes de garantie et de nature d'alimentation, de capacité d'absorption de charge par le poste de 40 MVA à 60 MVA dans le futur.

Le poste d'alimentation de la ligne TGV en 400 kV comporte l'utilisation permanente d'un terrain de 18 700 m². Le coût approximatif d'un poste de cette envergure avoisine 25 millions d'euros.

Option TGV dans la configuration C

Parce qu'elle ne suit pas le tracé de la ligne ferroviaire, la configuration C rend les deux projets indépendants. Une ligne additionnelle d'alimentation doit être prévue. Elle présente différentes alternatives techniques. La solution la plus appropriée est l'alimentation de la ligne TGV par une ligne supplémentaire de 225 kV. Elle requiert :

- l'extension du poste de Baixas avec la création d'une baie de transformation 400/225 kV avec deux transformateurs de 300 MVA,
- la réalisation d'une ligne 225 kV aérienne ou en câble souterrain entre Baixas et le poste d'alimentation SNCF,
- la réalisation du poste d'alimentation SNCF 225/25 kV.

Cette solution est utilisée couramment en France : 24 postes d'alimentation TGV sont recensés sur le territoire. Le coût total de cet ouvrage se chiffre aux alentours de 30 millions d'euros.

3.4. Détail et comparaison des neuf configurations

Configuration A

*Ligne aérienne en double terna entre Baixas et Bescanò
sur le parcours le plus court, le long de la ligne du TGV*

Le parcours (87 km, dont 29,7 km en France)

Le tracé est parallèle à celui prévu pour le TGV. Il n'existe pas d'autre ligne électrique sur ce parcours.

À la sortie du poste de Baixas, le parcours de la ligne traverse des zones urbanisées, Villeneuve Rivière, Le Soler et franchit la ligne TGV. À l'est de la ligne ferroviaire, le parcours longe les environs de Ponteilla, Villemolaque et Village Catalan. Le tracé qui passe à l'ouest serait mieux masqué vis-à-vis de Perpignan, Toulouges et Canohès, sous réserve de traverser plusieurs fois la ligne TGV. À la hauteur du Boulou, la ligne passe la rivière Tech et s'élève en montagne en quittant la ligne TGV qui poursuit en tunnel. La frontière est traversée à l'ouest du Fort de Bellegarde.

La construction

La construction ne constitue pas un défi technique : elle entre dans le champ de la grande expertise de RTE pour la réalisation d'ouvrages de cette envergure.

Un parcours de plaine et une élévation en montagne de 600 m ne constituent pas de difficultés particulières pour le dimensionnement des composants de la ligne.

Le coût

Le coût prévisionnel global se monte à 76,18 millions d'euros (dont 45,24 millions pour la construction). Pour le tronçon français, ces chiffres sont respectivement de 26 millions et de 15,45 millions.

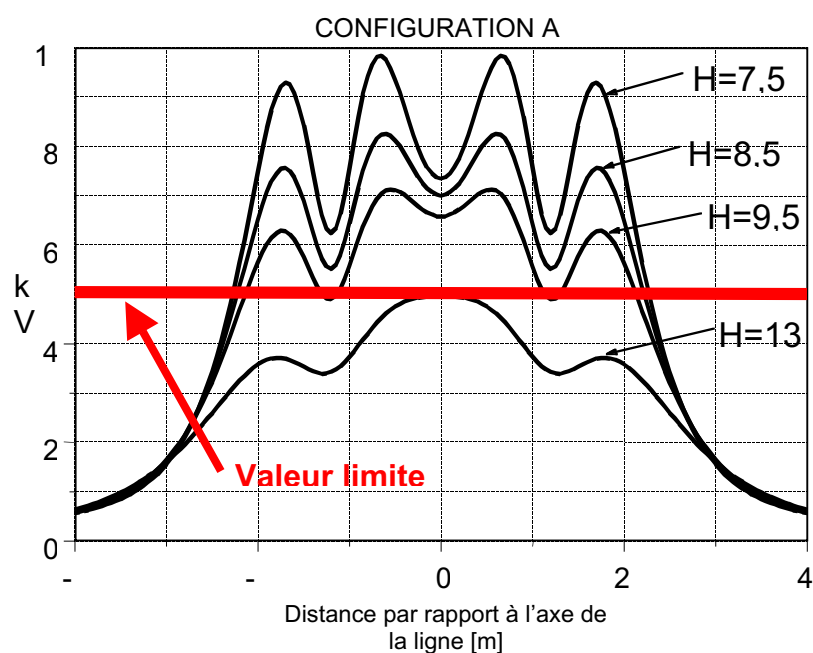
L'impact environnemental

L'impact visuel de cette ligne, qui traverse la plaine peut être important car le tracé se rapproche de zones densément habitées. D'autre part, l'élévation du parcours de la ligne en plaine étant moindre, la ligne ne devrait pas se voir à très grande distance (une zone de visibilité de la ligne de 2 km a été envisagée) ; en outre, il faut prendre en compte que d'autres structures suivant le même parcours sont présentes : autoroute, TGV, etc. et que ces structures pourraient contribuer à confondre la perception visuelle de la ligne.

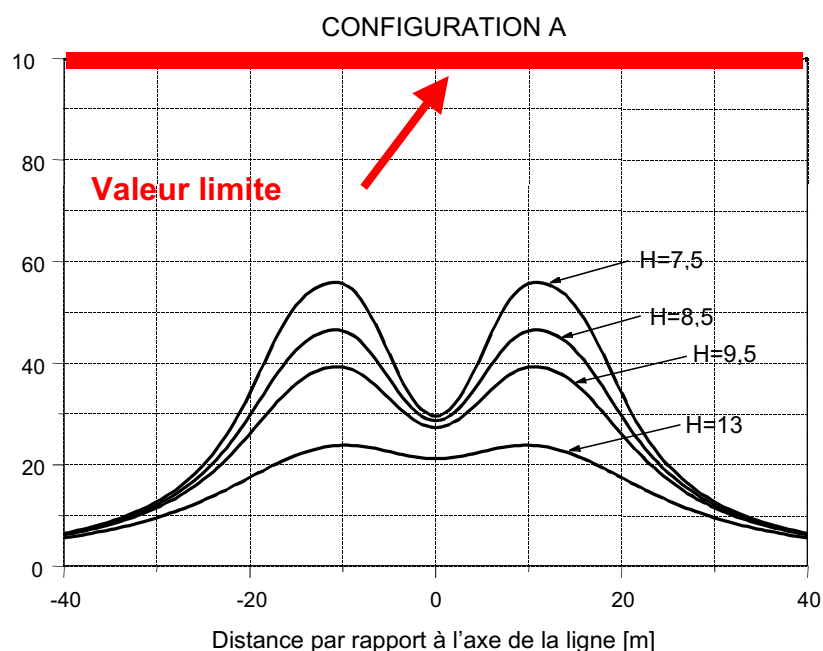
Champs électromagnétiques :

Le profil des champs électrique et magnétique de cette configuration est reporté dans les figures qui suivent. L'axe horizontal reporte les distances en mètres par rapport à l'axe de la ligne électrique, le « 0 » se trouvant sur l'axe. Les hauteurs différentes des conducteurs (reportées par le paramètre H dans les figures) se réfèrent au fait que la hauteur des conducteurs n'est pas constante le long de la ligne : en particulier, au point d'attache des conducteurs, la hauteur est maximale, tandis qu'en milieu de portée la hauteur devient moins importante. Les figures reportent aussi, avec un trait rouge, les niveaux de champs électrique et magnétique maximum admis par l'arrêté technique.

Profil de champ électrique à 1 m du sol pour la ligne aérienne en configuration A pour des hauteurs différentes de conducteurs



Profil de champ magnétique à 1 m du sol pour la ligne aérienne en configuration A pour des hauteurs différentes de conducteurs



Les mesures d'accompagnement

La réalisation de cette solution comporterait une compensation pour les communautés locales. Elle prévoit en outre l'enfouissement de lignes à haute tension sur une longueur équivalente à celle de chaque tene de ligne réalisée. Cet enfouissement pourrait concerner, par exemple, les lignes 63 kV ou 90 kV qui traversent les zones densément peuplées de

Saint-Estève ou Saint-Génis-des-Fontaines. Le calcul des longueurs de chaque terne porte à une hypothèse d'enfouissement d'environ 60 km de lignes HT.

Les critères de comparaison

Le tableau reporte l'évaluation qualitative des performances de cette alternative par rapport aux critères pris en compte.

		A
CRITERES TECHNIQUES	LONGUEUR DE CONNEXION	
	EXPERIENCE PRECEDENTE	
	FIABILITE TECHNOLOGIE	
	REDONDANCE CONFIGURATION	
	SURCHARGE EN CAS DE PROBLEME	
	DIFFICULTES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION	
	DUREE DE CHANTIER	
	COMPLEXITE MAINTENANCE	
	ALIMENTATION TGV	
	MESURES D'ACCOMPAGNEMENT	
CRITERES ENVIRONNEMENTAUX	IMPACT VISUEL	
	OCCUPATION DE TERRAIN EN PHASE DE CONSTRUCTION	
	OCCUPATION TERRAIN PERMANENTE.	
	CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES	
	IMPACT SUR FAUNE	
	INTERFERENCES HYDROGEOLOGIQUES	
	ZONES PROTEGEES	
CRITERES ECONOMIQUES	COUT DE REALISATION	
	COUT DES PERTES	
	COUT TOTAL	

Configuration B

*Ligne aérienne en double terre entre Baixas et Bescanò
sur un parcours alternatif qui évite
les zones plus densément peuplées*

La ligne en configuration A suit la ligne TGV mais passe parfois près d'agglomérations importantes. Un tracé alternatif a été pris en compte pour réduire ces nuisances et traverse des zones moins peuplées.

Le parcours (92 km, dont 34,6 km en France)

Le tracé de la ligne est d'abord parallèle à celui de la ligne 63 kV Baixas-Aspres. À partir des Aspres, la ligne suit le tracé du TGV. Comme dans la configuration A, la ligne traverse la rivière Tech à la hauteur de Le Boulou et s'élève en montagne en quittant la ligne TGV en tunnel à cet endroit.

Le coût

Le coût prévisionnel global se monte à 80,55 millions d'euros (dont 47,84 millions pour la construction). Pour le tronçon français, ces chiffres sont respectivement de 30,30 millions et de 18 millions.

L'impact environnemental

L'impact visuel de cette ligne est un peu moins important que celui de la configuration A, car la ligne passe plus loin des zones densément peuplées.

Les champs électromagnétiques sont identiques à ceux de la configuration A.

Les mesures d'accompagnement

La réalisation de cette ligne permettrait d'enfouir en compensation des tronçons de ligne haute tension sur une longueur d'environ 70 km.

Les critères de comparaison

Le tableau reporte l'évaluation qualitative des performances de cette alternative par rapport aux critères pris en compte.

		B
CRITERES TECHNIQUES	LONGUEUR DE CONNEXION	
	EXPERIENCE PRECEDENTE	
	FIABILITE TECHNOLOGIE	
	REDONDANCE CONFIGURATION	
	SURCHARGE EN CAS DE PROBLEME	
	DIFFICULTES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION	
	DUREE DE CHANTIER	
	COMPLEXITE MAINTENANCE	
	ALIMENTATION TGV	
	MESURES D'ACCOMPAGNEMENT	
CRITERES ENVIRONNEMENTAUX	IMPACT VISUEL	
	OCCUPATION DE TERRAIN EN PHASE DE CONSTRUCTION	
	OCCUPATION TERRAIN PERMANENTE.	
	CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES	
	IMPACT SUR FAUNE	
	INTERFERENCES HYDROGEOLOGIQUES	
CRITERES ECONOMIQUES	ZONES PROTEGEES	
	COUT DE REALISATION	
	COUT DES PERTES	
	COUT TOTAL	

Configuration C

*Ligne aérienne en renforcement de la ligne existante Baixas-Vic,
ligne en simple terna le long de la portion
où la ligne Baixas-Vic est en double terna
et ligne en double terna à partir du point
où la ligne Baixas-Vic est en simple terna*

La construction d'une ligne aérienne dans la plaine de Perpignan pose le problème d'adaptation à une situation nouvelle puisque aucun ouvrage semblable n'existe.

Sur l'axe Baixas-Vic, une ligne 400 kV existe déjà. Cette ligne s'éloigne rapidement des aires urbanisées de la plaine pour se porter en montagne. Dès lors, l'impact visuel vis-à-vis du Massif du Canigou est réduit. Le tracé de la configuration C prévoit de suivre la ligne actuelle Baixas-Vic pour en permettre le renforcement jusqu'au niveau de puissance requis pour l'interconnexion.

La structure actuelle de la ligne Baixas-Vic laisse entrevoir des synergies intéressantes avec la nouvelle ligne. La configuration C consiste à utiliser le premier tronçon de la ligne Baixas-Vic en séparant les ternes.

Pour la nouvelle ligne THT, il faudrait donc prévoir un tronçon supplémentaire en simple terna là où elle est en double terna et un tronçon supplémentaire en double terna là où elle est en simple terna. Au final : deux lignes contiguës, en simple et en double terna.

Le parcours (110 km, dont 59 km en France)

La ligne sort du poste de Baixas en direction de l'ouest et reste parallèle dans le premier tronçon à la rivière Tet. Aux environs de Ille-sur-Tet, la ligne passe la rivière et s'engage vers un territoire de collines boisées avec de petites agglomérations éparses. En restant sur le versant est du Massif du Canigou, la ligne monte vers la frontière qu'elle traverse près du Mont Falgas. L'altitude maximale de cette connexion dépasse de peu 1500 m.

Le coût

Le coût prévisionnel global se monte à 93,31 millions d'euros (dont 57,20 millions pour la construction). Pour le tronçon français, ces chiffres sont respectivement de 57,66 millions et de 36,68 millions.

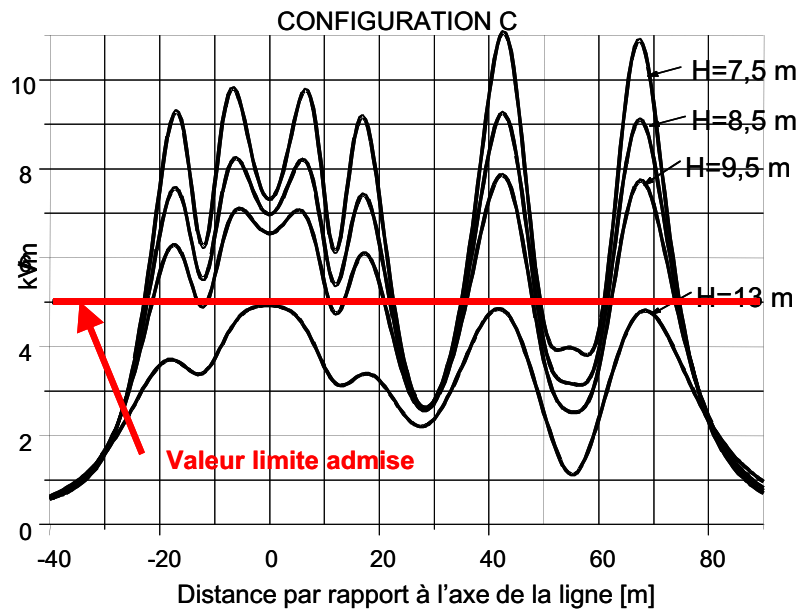
L'impact environnemental

L'impact visuel de cette ligne est moins important que celui des configurations A et B, car la ligne passe beaucoup plus loin par rapport aux zones habitées.

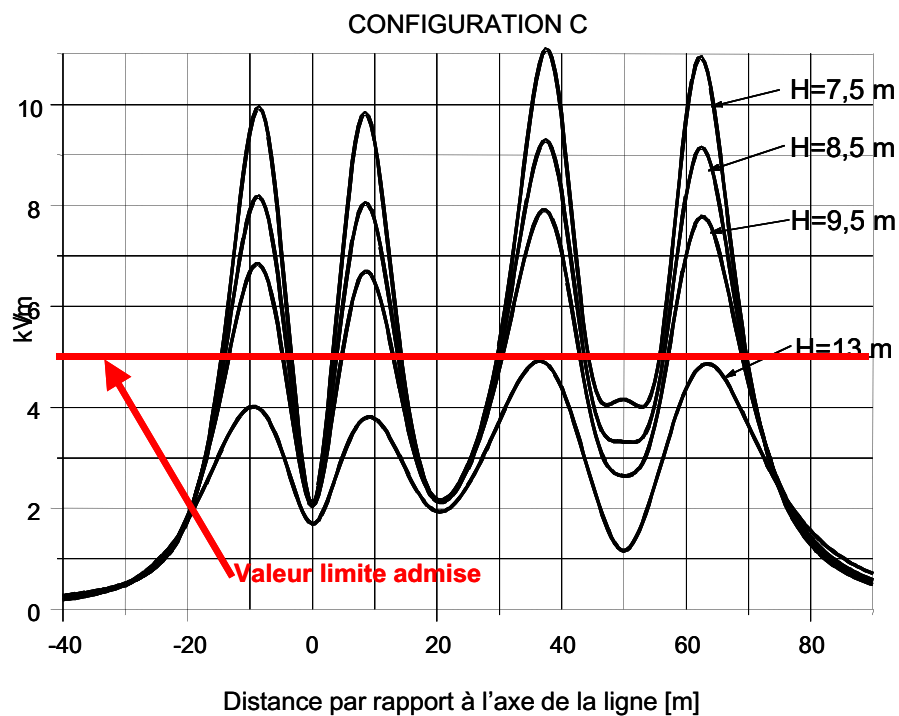
Champs électromagnétiques

Comme dans la configuration A, toute ligne qui est en dessous de la valeur limite admise pour le champ électrique est en dessous de la valeur limite pour le champ magnétique ; on a reporté ici seulement les profils de champs électriques.

Profil de champ électrique à 1 m du sol pour une ligne simple terre (support T-A)
à coté d'une ligne double terre en plaine (support F44)



Profil de champ électrique à 1 m du sol pour une ligne simple terre (support T-A)
à coté d'une ligne double terre en montagne (support F5)



Les mesures d'accompagnement

La réalisation de cette ligne comporterait comme précédemment la possibilité d'enfouir en compensation d'autres lignes haute tension, sur une longueur de 120 km.

Il convient enfin de souligner que cette configuration, ayant un point d'arrivée à Vic au lieu de Bescanò, ne permet pas la fermeture de l'anneau électrique Baixas-Vic-Sentmenat-Bescanò-Figueres-Baixas. Ceci pourrait avoir des conséquences sur le fonctionnement du réseau espagnol. Il serait probablement nécessaire pour REE (Red Electrica de Espana, voir

Glossaire page 45) de construire une ligne supplémentaire en Espagne qui relierait Bescanò à Vic. Les impacts de cette ligne ne sont pas pris en compte dans cette étude.

Les critères de comparaison

Le tableau reporte l'évaluation qualitative des performances de cette alternative par rapport aux critères pris en compte.

		C
CRITERES TECHNIQUES	LONGUEUR DE CONNEXION	
	EXPERIENCE PRECEDENTE	
	FIABILITE TECHNOLOGIE	
	REDONDANCE CONFIGURATION	
	SURCHARGE EN CAS DE PROBLEME	
	DIFFICULTES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION	
	DUREE DE CHANTIER	
	COMPLEXITE MAINTENANCE	
	ALIMENTATION TGV	
	MESURES D'ACCOMPAGNEMENT	
CRITERES ENVIRONNEMENTAUX	IMPACT VISUEL	
	OCCUPATION DE TERRAIN EN PHASE DE CONSTRUCTION	
	OCCUPATION TERRAIN PERMANENTE.	
	CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES	
	IMPACT SUR FAUNE	
	INTERFERENCES HYDROGEOLOGIQUES	
	ZONES PROTEGEES	
CRITERES ECONOMIQUES	COUT DE REALISATION	
	COUT DES PERTES	
	COUT TOTAL	

Configuration D

*Ligne aérienne en renforcement de la ligne existante Baixas-Vic
avec une structure qui prévoit un poteau séparé
pour chaque terna (ligne en simple terna)*

L'utilisation de deux simples ternes en alternative à une ligne en double terna permet d'avoir un degré de liberté supplémentaire dans le choix des parcours. En effet, dans les endroits les plus critiques, le parcours des deux ternes peut se séparer pour alléger localement les impacts visuels. Cette hypothèse est une alternative à la configuration C sur le même tracé.

Le parcours (110 km, dont 59 km en France)

Il est identique au tracé de la ligne de la configuration C.

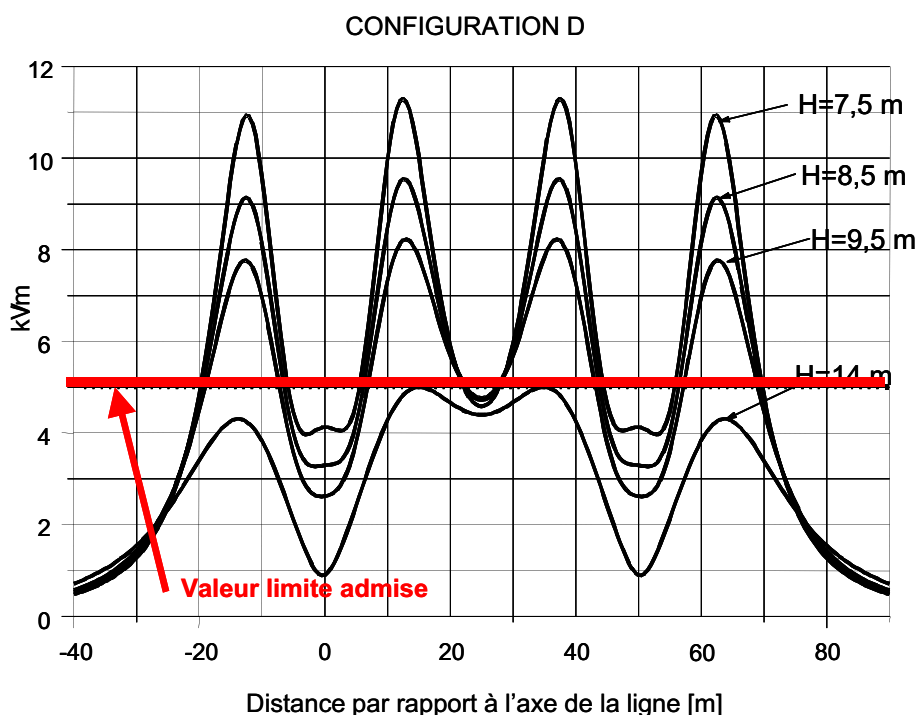
Le coût

Le coût prévisionnel global se monte à 102,1 millions d'euros (dont 62,15 millions pour la construction). Pour le tronçon français, ces chiffres sont respectivement de 54,75 millions et de 33,33 millions.

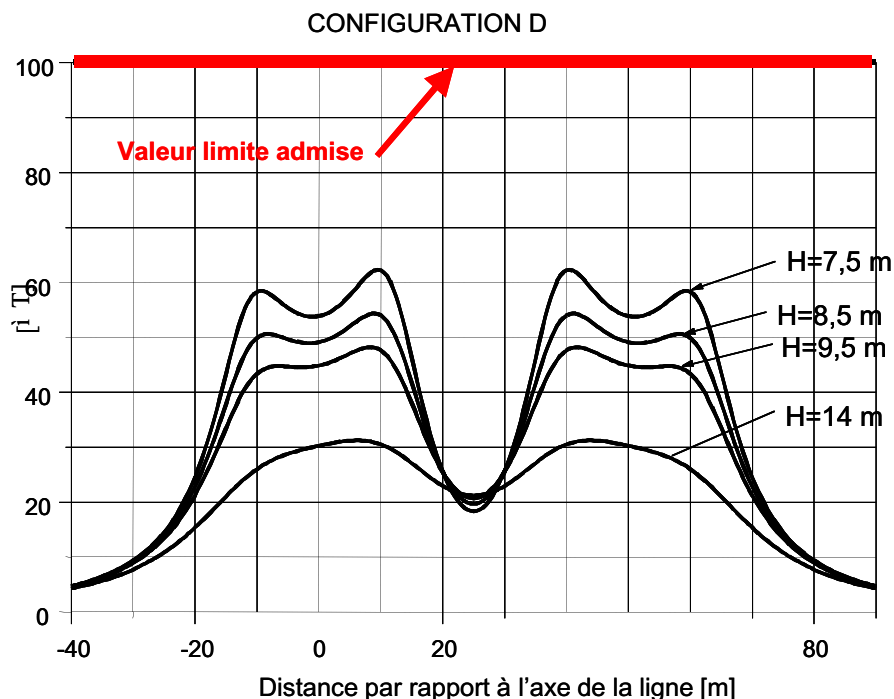
L'impact environnemental

Champs électromagnétiques

*Profil de champ électrique à 1 m du sol pour la ligne aérienne en configuration D
pour des hauteurs différentes de conducteurs*



Profil de champ magnétique à 1 m du sol pour la ligne aérienne en configuration D pour des hauteurs différentes de conducteurs



De même que dans la configuration C, la réalisation de cette ligne incorpore la possibilité d'enfouir 120 km de ligne haute tension.

Les critères de comparaison

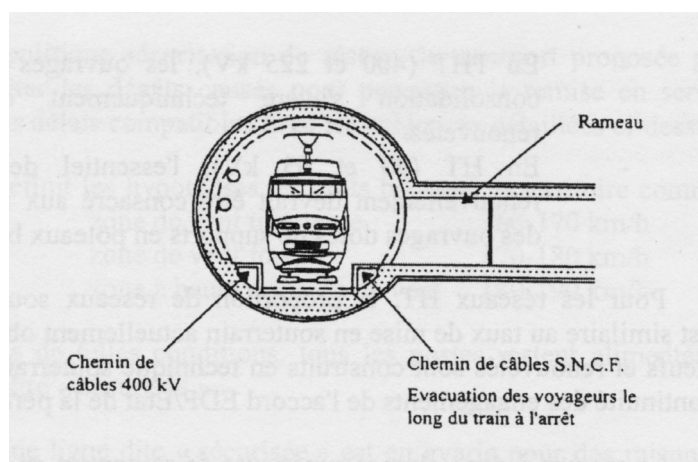
Le tableau reporte l'évaluation qualitative des performances de cette alternative par rapport aux critères pris en compte.

		D
CRITERES TECHNIQUES	LONGUEUR DE CONNEXION	
	EXPERIENCE PRECEDENTE	
	FIABILITE TECHNOLOGIE	
	REDONDANCE CONFIGURATION	
	SURCHARGE EN CAS DE PROBLEME	
	DIFFICULTES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION	
	DUREE DE CHANTIER	
	COMPLEXITE MAINTENANCE	
	ALIMENTATION TGV	
CRITERES ENVIRONNEMENTAUX	MESURES D'ACCOMPAGNEMENT	
	IMPACT VISUEL	
	OCCUPATION DE TERRAIN EN PHASE DE CONSTRUCTION	
	OCCUPATION TERRAIN PERMANENTE.	
	CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES	
	IMPACT SUR FAUNE	
	INTERFERENCES HYDROGEOLOGIQUES	
CRITERES ECONOMIQUES	ZONES PROTEGEES	
	COUT DE REALISATION	
	COUT DES PERTES	
	COUT TOTAL	

Configuration E

*Ligne en câble souterrain à isolation synthétique
entre Baixas et Bescanò avec pose en tunnel*

L'option câble souterrain permet de réduire les impacts visuels et électromagnétiques auxquels les populations riveraines sont les plus sensibles. Une ligne a donc été envisagée sur le parcours le plus court entre les postes de Baixas et Bescanò le long du tracé du TGV. L'option retenue est la pose en tunnel aéré. Les câbles sont accessibles pour la maintenance et la réparation.



Intégration des câbles THT dans la structure du tunnel TGV

Le parcours (87 km, dont 29,6 km en France)

Le tracé de la ligne suit celui du TGV sur toute sa longueur. Ce parcours suppose le passage dans un tunnel de la ligne ferroviaire. Dans cette portion de tracé, le câble peut être intégré dans le tunnel ferroviaire.

La construction

Même s'il n'existe aucune ligne 400 kV dans ce schéma, les études approfondies conduites par RTE avec la SNCF ont démontré la faisabilité d'une réalisation de ligne en tunnel ferroviaire. Lors du projet de détail de cette configuration, il faudra dimensionner et choisir l'emplacement des réacteurs de compensation du réactif dans le poste de Baixas et à l'arrivée en Espagne : en effet, pour les câbles de cette envergure, on observe un processus de charge et de déchargement continu. La tension qui s'inverse au rythme de 50 fois par seconde limite les capacités de transport du câble. Un système de courant compensateur, dit « réactif » doit être mis en œuvre pour garantir les niveaux de puissance requis.

Le coût

Le coût prévisionnel global se monte à 532 millions d'euros (dont 522,2 millions pour la construction). Pour le tronçon français, ces chiffres sont respectivement de 204 millions et de 200,8 millions.

L'impact environnemental

La solution câbles enterrés en tunnel permet d'annuler la quasi-totalité des impacts visuels. Seules restent visibles les cheminées et bouches d'aération.

Champs électromagnétiques

Les gaines conductrices des câbles assurent un effet d'écran et permettent de réduire le niveau de champ électrique.

Celui-ci, y compris au-dessus de la ligne elle-même, est très inférieur à la limite admise.

Les critères de comparaison

Le tableau reporte l'évaluation qualitative des performances de cette alternative par rapport aux critères pris en compte.

		E
CRITERES TECHNIQUES	LONGUEUR DE CONNEXION	
	EXPERIENCE PRECEDENTE	
	FIABILITE TECHNOLOGIE	
	REDONDANCE CONFIGURATION	
	SURCHARGE EN CAS DE PROBLEME	
	DIFFICULTES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION	
	DUREE DE CHANTIER	
	COMPLEXITE MAINTENANCE	
	ALIMENTATION TGV	
	MESURES D'ACCOMPAGNEMENT	
CRITERES ENVIRONNEMENTAUX	IMPACT VISUEL	
	OCCUPATION DE TERRAIN EN PHASE DE CONSTRUCTION	
	OCCUPATION TERRAIN PERMANENTE.	
	CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES	
	IMPACT SUR FAUNE	
	INTERFERENCES HYDROGEOLOGIQUES	
CRITERES ECONOMIQUES	ZONES PROTEGEES	
	COUT DE REALISATION	
	COUT DES PERTES	
	COUT TOTAL	

Configuration F

*Ligne en câble souterrain à isolation synthétique
entre Baixas et Bescanò
avec pose en fourreaux et disposition en trèfle*

Sur le même parcours que celui pris en compte pour la configuration E, le câble souterrain est posé directement dans le terrain.

Le parcours (87 km, dont 29,6 km en France)

Le tracé suit celui de la ligne TGV sur toute sa longueur.

La construction

De la même façon que précédemment, le parcours suppose le passage dans un tunnel de la ligne ferroviaire. Dans cette portion de tracé, le câble peut être intégré dans le tunnel ferroviaire.

Cette configuration suppose des contraintes de courant réactif encore plus importantes que celles de la configuration E.

Le coût

Le coût prévisionnel global se monte à 534,3 millions d'euros (dont 518 millions pour la construction). Pour le tronçon français, ces chiffres sont respectivement de 205,76 millions et de 200 millions.

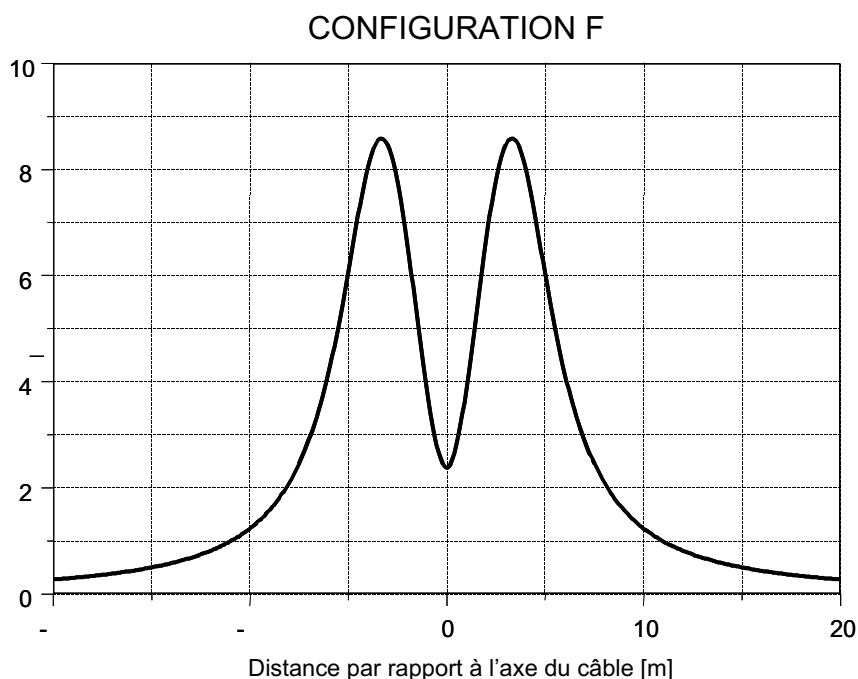
L'impact environnemental

Cette solution présente également les mêmes avantages au niveau visuel pour ne laisser apparent que les seules cheminées et bouches d'aération.

Champs électromagnétiques

L'effet d'écran exercé par les gaines conductrices des câbles permet aussi de réduire le champ électrique.

Profil du champ magnétique de la ligne en configuration F : ligne en câble souterrain à isolation synthétique entre Baixas et Bescanò avec pose en fourreaux et disposition en trèfle



Les critères de comparaison

Le tableau reporte l'évaluation qualitative des performances de cette alternative par rapport aux critères pris en compte.

		F
CRITERES TECHNIQUES	LONGUEUR DE CONNEXION	
	EXPERIENCE PRECEDENTE	
	FIABILITE TECHNOLOGIE	
	REDONDANCE CONFIGURATION	
	SURCHARGE EN CAS DE PROBLEME	
	DIFFICULTES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION	
	DUREE DE CHANTIER	
	COMPLEXITE MAINTENANCE	
	ALIMENTATION TGV	
	MESURES D'ACCOMPAGNEMENT	
CRITERES ENVIRONNEMENTAUX	IMPACT VISUEL	
	OCCUPATION DE TERRAIN EN PHASE DE CONSTRUCTION	
	OCCUPATION TERRAIN PERMANENTE.	
	CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES	
	IMPACT SUR FAUNE	
	INTERFERENCES HYDROGEOLOGIQUES	
CRITERES ECONOMIQUES	ZONES PROTEGEES	
	COUT DE REALISATION	
	COUT DES PERTES	
	COUT TOTAL	

Configuration G

*Ligne en câble à isolation gazeuse entre Baixas et Bescanò
avec pose directement enterrée*

Comme pour les câbles à isolation synthétique, l'option câble à isolation gazeuse permet de diminuer l'impact visuel mais réduit encore davantage l'impact électromagnétique. Pour des raisons de coûts, le tracé le plus court choisi demeure celui du TGV avec option d'enterrement direct dans le terrain.

Le parcours (87 km, dont 29,6 km en France)

La présence d'un tronçon à l'intérieur du tunnel TGV impose de vérifier la faisabilité de l'intégration de la ligne à isolation gazeuse par des études spécifiques. Ces câbles présentent un diamètre bien plus élevé.

La construction

Jusqu'à présent, aucune installation de câble à isolation gazeuse de cette envergure n'a été réalisée dans le monde. Les travaux expérimentaux menés par EDF établissent que cette solution est possible avec des méthodes dérivées de celles utilisées dans l'industrie du pipeline.

Le coût

Le coût prévisionnel global se monte à 620 millions d'euros (dont 609 millions pour la construction). Pour le tronçon français, ces chiffres sont respectivement de 212 millions et de 208 millions.

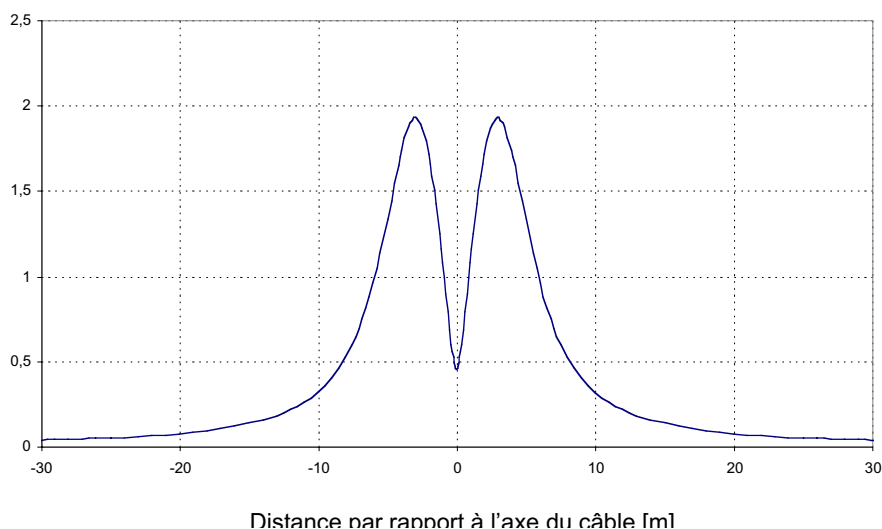
L'impact environnemental

La solution en câble à isolation permet d'annuler les impacts visuels dans leur intégralité.

Champs électromagnétiques

Le courant circulant dans l'enveloppe du CIG d'une valeur égale et d'un sens opposé à celui des conducteurs crée un écran très efficace contre les champs magnétiques.

Profil du champ magnétique à 1 m du sol pour un CIG double terre
CONFIGURATION G



Les critères de comparaison

Le tableau reporte l'évaluation qualitative des performances de cette alternative par rapport aux critères pris en compte.

		G
CRITERES TECHNIQUES	LONGUEUR DE CONNEXION	
	EXPERIENCE PRECEDENTE	
	FIABILITE TECHNOLOGIE	
	REDONDANCE CONFIGURATION	
	SURCHARGE EN CAS DE PROBLEME	
	DIFFICULTES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION	
	DUREE DE CHANTIER	
	COMPLEXITE MAINTENANCE	
	ALIMENTATION TGV	
CRITERES ENVIRONNEMENTAUX	MESURES D'ACCOMPAGNEMENT	
	IMPACT VISUEL	
	OCCUPATION DE TERRAIN EN PHASE DE CONSTRUCTION	
	OCCUPATION TERRAIN PERMANENTE.	
	CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES	
	IMPACT SUR FAUNE	
CRITERES ECONOMIQUES	INTERFERENCES HYDROGEOLOGIQUES	
	ZONES PROTEGEES	
	COUT DE REALISATION	
	COUT DES PERTES	
	COUT TOTAL	

Configuration H

*Ligne en câble souterrain + câble sous-marin entre Baixas
et Figueres alimentée en tension continue*

La configuration en tension continue fait apparaître quatre points nécessaires à sa mise en œuvre :

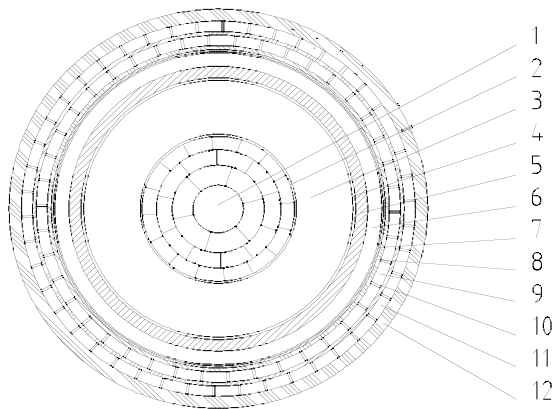
- Réalisation d'un poste de conversion comme extension du poste de Baixas,
- Pose d'un câble synthétique souterrain entre Baixas et la zone où l'Agly débouche vers la mer,
- Pose d'un câble sous-marin le long de la côte jusqu'à un endroit du rivage espagnol à la parallèle de Figueres,
- Pose d'un câble souterrain jusqu'à Figueres où le second poste de conversion DC-AC serait réalisé.

L'étude d'ingénierie de base d'un système HVDC de cette envergure est très complexe. Seuls quelques aspects à prendre en compte sont mentionnés. Les informations sont à considérer comme indicatives et de toute première approximation.

Le parcours en France (19 km souterrains + 39 km sous-marins)

À partir du poste de Baixas, le tracé de la ligne s'oriente nord-est vers la rivière Agly. Il la rejoint aux abords du pont de l'autoroute, et la suit jusqu'à la mer. Au départ, le parcours sous-marin est perpendiculaire à la côte, puis la suit à une distance suffisante pour éviter les problèmes liés à la pêche à la traîne et aux contraintes mécaniques. Aux endroits où le câble n'atteint pas les profondeurs requises pour un niveau de fiabilité suffisant, il sera enfoui. Le câble sous-marin dépasse ainsi la frontière.

Section type d'un câble en PPL



- 1- Conducteurs à voussoirs en cuivre, section comprise entre 1600 mm² et 2000 mm² pour le tronçon sous-terrain et d'environ 1250 mm² pour le tronçon sous-marin.
- 2- Ecran semi-conducteur
- 3- Isolant en laminé papier-polypropylène imprégné de mélange visqueux.
- 4- Ecran semi-conducteur
- 5- Gaine en alliage de plomb
- 6- Gaine anticorrosive en alliage de plomb
- 7- Blindage à bande d'acier
- 8- Rembourrage à bande de polyester
- 9- 1^{ère} armure à plaques d'acier sens d'application droite
- 10- Ligature en fil de polypropylène
- 11- 2^{ème} armure à plaques d'acier sens d'application gauche
- 12- Ligature extérieure en fil de polypropylène

La construction

Même si la construction d'installations en tension continue n'est nulle part standardisée, en termes d'occupation de terrain, 120000 m² de terrain sont à prévoir pour la construction d'un poste de conversion de 4000 MW.

Le coût

Le coût prévisionnel global se monte à 1 milliard d'euros (dont 700 millions pour la construction). Pour le tronçon français, ces chiffres sont respectivement de 516,5 millions et de 350 millions.

L'impact environnemental

À moins de cinq mètres des électrodes, les champs électriques peuvent engendrer des effets négatifs sur les organismes marins. Les produits de l'électrolyse, composés primaires et secondaires sont potentiellement toxiques. La toxicité varie sensiblement en fonction de l'espèce marine considérée.

Les champs électromagnétiques créés par les câbles sous-marins peuvent avoir des effets sur les boussoles des bateaux et leurs systèmes de guidage.

Les critères de comparaison

Le tableau reporte l'évaluation qualitative des performances de cette alternative par rapport aux critères pris en compte.

		H
CRITERES TECHNIQUES	LONGUEUR DE CONNEXION	
	EXPERIENCE PRECEDENTE	
	FIABILITE TECHNOLOGIE	
	REDONDANCE CONFIGURATION	
	SURCHARGE EN CAS DE PROBLEME	
	DIFFICULTES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION	
	DUREE DE CHANTIER	
	COMPLEXITE MAINTENANCE	
	ALIMENTATION TGV	
	MESURES D'ACCOMPAGNEMENT	
CRITERES ENVIRONNEMENTAUX	IMPACT VISUEL	
	OCCUPATION DE TERRAIN EN PHASE DE CONSTRUCTION	
	OCCUPATION TERRAIN PERMANENTE.	
	CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES	
	IMPACT SUR FAUNE	
	INTERFERENCES HYDROGEOLOGIQUES	
CRITERES ECONOMIQUES	COUT DE REALISATION	
	COUT DES PERTES	
	COUT TOTAL	

Configuration I

*Ligne mixte aéro-souterraine entre Baixas et Bescanò prévoyant
des tronçons en câble souterrains
dans les endroits les plus densément peuplés*

Cette configuration est dérivée de la configuration A (ligne aérienne en double terna sur le tracé Baixas-Bescanò) mais est constituée dans la partie initiale (approximativement sur le tronçon Baixas-Le Soler) d'un tronçon en câble avec pose en tunnel aéré. Du point de vue des évaluations qui ont été faites, le choix de la position du tronçon en câble n'a aucune influence : ce tronçon peut donc en principe être placé n'importe où le long de la ligne.

Le parcours (77 km, dont 24,7 km en France pour le tronçon en ligne aérienne ; 5 km pour le tronçon en câble souterrain)

À partir du poste de Baixas, la ligne part en câble en tunnel aéré. À la sortie du poste de Baixas, le parcours de la ligne rejoint celui du TGV en traversant en souterrain des zones densément peuplées (Villeneuve-la-Rivière, Le Soler). Le câble souterrain termine dans le poste d'alimentation du TGV à 5 km de Baixas. De là, la ligne poursuit en aérien selon le parcours de la configuration A. Le parcours continue de longer la ligne TGV par l'est et passe dans les environs de Ponteilla, Villemolaque et Village-Catalan. Sous réserve de pouvoir traverser à plusieurs reprises la ligne TGV, le parcours ouest par rapport à la ligne ferroviaire serait mieux dissimulé vis-à-vis de Toulouges, Canohès et Perpignan. La rivière Tech est traversée à la hauteur de Le Boulou. La ligne s'élève en montagne en quittant celle du TGV qui poursuit en tunnel. La frontière est passée à l'ouest du Fort de Bellegarde.

Le coût

Le coût prévisionnel global se monte à 113 millions d'euros (dont 73,8 millions pour la construction). Pour le tronçon français, ces chiffres sont respectivement de 59,6 millions et de 48,8 millions.

L'impact environnemental

Sur les aspects environnementaux et ceux liés aux champs électromagnétiques cette configuration ramène aux données des configurations A et E sur les lignes aériennes et les câbles en tunnel.

Les critères de comparaison

Le tableau reporte l'évaluation qualitative des performances de cette alternative par rapport aux critères pris en compte.

		I
CRITERES TECHNIQUES	LONGUEUR DE CONNEXION	
	EXPERIENCE PRECEDENTE	
	FIABILITE TECHNOLOGIE	
	REDONDANCE CONFIGURATION	
	SURCHARGE EN CAS DE PROBLEME	
	DIFFICULTES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION	
	DUREE DE CHANTIER	
	COMPLEXITE MAINTENANCE	
	ALIMENTATION TGV	
	MESURES D'ACCOMPAGNEMENT	
CRITERES ENVIRONNEMENTAUX	IMPACT VISUEL	
	OCCUPATION DE TERRAIN EN PHASE DE CONSTRUCTION	
	OCCUPATION TERRAIN PERMANENTE.	
	CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES	
	IMPACT SUR FAUNE	
	INTERFERENCES HYDROGEOLOGIQUES	
	ZONES PROTEGEES	
CRITERES ECONOMIQUES	COUT DE REALISATION	
	COUT DES PERTES	
	COUT TOTAL	

COMPARAISON DES DIFFERENTES CONFIGURATIONS

Face à la complexité du problème et à la corrélation de toutes les alternatives possibles, l'approche multicritères, basée sur la hiérarchie analytique, permet d'établir le tableau ci-dessous. Les paramètres sont comparés au moyen d'un code couleurs qui représente les impacts relatifs.

Comparaison des alternatives vis-à-vis des critères mis au point

		A	B	C	D	E	F	G	H	I
CRITERES TECHNIQUES	LONGUEUR DE CONNEXION									
	EXPERIENCE PRECEDENTE									
	FIABILITE TECHNOLOGIE									
	REDONDANCE CONFIGURATION									
	SURCHARGE EN CAS DE PROBLEME									
	DIFFICULTES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION									
	DUREE DE CHANTIER									
	COMPLEXITE MAINTENANCE									
	ALIMENTATION TGV									
	MESURES D'ACCOMPAGNEMENT									
CRITERES ENVIRONNEMENTAUX	IMPACT VISUEL									
	OCCUPATION DE TERRAIN EN PHASE DE CONSTRUCTION									
	OCCUPATION TERRAIN PERMANENTE.									
	CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES									
	IMPACT SUR FAUNE ET LA FLORE									
	INTERFERENCES HYDROGEOLOGIQUES									
	ZONES PROTEGEES									
CRITERES ECONOMIQUES	COUT DE REALISATION									
	COUT DES PERTES									
	COUTS DE DEFABRICATION									

- Rappel du code couleurs :

Vert foncé	Très favorable
Vert clair	Favorable
Jaune	Moyen
Orange	Critique
Rouge	Très critique

- Rappel des configurations :

Lignes aériennes longeant le TGV

- Configuration A
- Configuration B

Câbles souterrains longeant le TGV

- Configuration E
- Configuration F
- Configuration G

Liaison mixte aérien-souterrain longeant le TGV

- Configuration I

Ligne aérienne

- Configuration C
- Configuration D

Câble sous-marin par l'Agly

- Configuration H

- En accord avec son commanditaire CESI ne reporte dans son rapport aucune pondération entre les critères de comparaison.

GLOSSAIRE

CATENAIRE

Système de suspension des câbles électriques servant à l'alimentation des lignes ferroviaires, qui les maintient à une distance rigoureusement constante du sol.

CONDUCTEUR

Câble flexible dans lequel transite le flux d'énergie :

- les conducteurs sont fixés au support par des *isolateurs* en verre, porcelaine ou autre matière composite et du matériel d'équipement en acier,
- les *supports* pour les lignes à haute tension peuvent être réalisés en charpentes métalliques ou en tôle pliée.

CONVERTISSEUR

Dispositif destiné à redresser une tension alternative en tension continue.

CÂBLES À ISOLATION SYNTHÉTIQUE

Câbles composés d'une « âme » en cuivre ou en aluminium – qui permet le transit du courant - , d'un écran semi-conducteur interne en polyéthylène, d'une enveloppe isolante, également en polyéthylène, d'un écran semi-conducteur externe, d'un écran métallique en alliage de plomb ou en aluminium et d'une gaine extérieure.

CÂBLES À ISOLATION GAZEUSE

Câbles dont l'isolation électrique est assurée par de l'azote sous pression. Cette technologie devrait, à terme, contribuer à faciliter la mise en souterrain de liaisons très haute tension sur de plus longues distances qu'il n'est possible actuellement.

CHAMP ELECTRIQUE

Écart de potentiel entre le conducteur et le milieu environnant, proportionnel à la tension de la ligne ; son intensité en volts par mètre au sol dépend de la tension et de la hauteur de la ligne.

CHAMP MAGNETIQUE

Dépend de l'intensité du courant électrique et de la distance au conducteur ; s'exprime en *gauss* ou en *teslas*.

COGÉNÉRATION

Système de production simultanée de chaleur et d'électricité.

CONGESTION

Limitation du transit sur une ligne pour satisfaire aux exigences techniques du réseau, compte tenu des performances et comportement des équipements.

DIÉLECTRIQUE

Se dit d'une substance capable d'emmagasiner de l'énergie électrostatique.

EFFET JOULE

Dégagement de chaleur dans un conducteur parcouru par un courant électrique.

FOURREAUX

Éléments préfabriqués en « U » utilisés pour la protection des câbles souterrains contre les dommages externes.

LGV

Ligne ferroviaire à Grande Vitesse (=TGV)

INTERCONNEXION

Mise en relation physique de réseaux électriques entre eux, pour des échanges d'énergie ; par extension, sont ainsi appelées les lignes électriques assurant cette liaison.

GESTIONNAIRE DU RESEAU DE TRANSPORT

Acteur du marché de l'exploitation, de l'entretien, du développement du réseau, des interconnexions avec l'étranger, de la gestion des flux d'électricité. Il garantit la sécurité et l'efficacité du réseau, élabore les programmes d'investissement et lance les appels d'offre aux sites de production. Ce rôle est joué en France par RTE.

LIGNES À HAUTE TENSION (HT)

Lignes portant des circuits électriques d'une tension de 63 000 ou 90 000 volts.

LIGNES À TRES HAUTE TENSION (THT)

Ligne portant des circuits électriques d'une tension de 225 000 à 400 000 volts.

MATÉRIAUX SUPRACONDUCTEURS

Métaux dont la résistivité électrique est pratiquement nulle au-dessous d'une certaine température.

NTC

Net Transfert Capacity (Capacité Nette de Transport) : niveau de puissance maximale conventionnel qui peut transiter dans un système d'interconnexion (par exemple dans l'ensemble des lignes transfrontalières entre deux pays). Cette valeur est calculée à partir de la capacité de transport dimensionnelle (GTC, Gross Transfer Capacity : qui est l'addition algébrique des capacités des lignes) réduite d'un facteur qui tient compte des critères de sécurité et d'un facteur ultérieur qui tient compte des événements imprévus.

NIVEAU D'INTERCONNEXION

Rapport entre la capacité nette de transport sur toutes les frontières d'un pays et la capacité de génération électrique du pays même (exprimé en %).

PERTES EN LIGNE

Déperdition physique d'électricité dans les lignes de transport par l'effet Joule.

REE

Red Electrica de Espana (équivalent espagnol de RTE)

RTE

(voir « GESTIONNAIRE DU RESEAU DE TRANSPORT »)

TAUX D'INTERCONNEXION

Rapport de la somme des capacités de transport des lignes d'interconnexion sur la consommation de pointe du pays. Ce ratio traduit la capacité de secours qu'un pays peut attendre en cas d'incident de la part de ses voisins.

TERNE

Ensemble des trois câbles de transport d'une ligne aérienne triphasée.

TRANSFORMATEUR

Appareil statique à induction électromagnétique qui transforme un système de courants variables en un ou plusieurs autres systèmes de courants variables de même fréquence, mais d'intensité et de tension différentes.

TUNNEL

Utilisé pour la pose de câbles souterrains quand de nombreux circuits doivent être installés simultanément le long du même parcours ou quand la transmission de puissance exigée sera difficilement assurée par la technique de l'enterrement direct ou tuyauterie :

- pose en fourreaux avec disposition en trèfle
- pose en fourreaux avec disposition plane

UCTE

Union pour la Coordination du Transport de l'Électricité.