

Client prof. Mario Monti - Coordonnateur Européen pour l'interconnexion électrique entre la France et l'Espagne

Sujet Possibles solutions technologiques pour une nouvelle ligne d'interconnexion entre la France et l'Espagne . Cahier n° 4

Commande

Notes version originale en langue française

PUBBLICATO A8011725 (PAD - 1047382)

Ce document ne peut pas être reproduit sauf dans sa version intégrale sans autorisation écrite de CESI

N. de pages 37 **N. de pages annexées:** 0

Date d'émission: 28 avril 2008

Prepared IMP - Cova Bruno
A8011725 2982 ALI
Michele de Nigris (CESI RICERCA)

Verified SIS - Ardito Antonio
A8011725 2935 VER

Approved SIS - Il Responsabile - Ardito Antonio
A8011725 2935 APP

Mod. RAPP v. 01

Table des matières

1	INTRODUCTION.....	3
2	COMPARAISON DES SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES.....	3
3	IMPACT ENVIRONNEMENTAL D'UN NOUVEL AXE ENTRE LA FRANCE ET L'ESPAGNE.....	13
3.1.1	Milieu physique, naturel et humain.....	13
3.1.2	Les impacts de la technologie aérienne en courant alternatif.....	22
3.1.3	Les impacts de la technologie souterraine en courant alternatif.....	24
3.1.4	Les impacts de la technologie souterraine en courant continu.....	28
3.1.5	Les impacts de la technologie sous marine en courant continu.....	30
4	POSSIBILITE DE SYNERGIE AVEC LA LIGNE TGV: TRAVERSEE DES PYRENEES EN TUNNEL.....	32
5	ETUDES NECESSAIRES POUR LA SOLUTION EN COURANT CONTINU.....	35

1 INTRODUCTION

CESI a été chargé par le Coordonnateur Européen de rédiger un rapport sur les alternatives technologiques envisageables pour une nouvelle liaison électrique entre la France et l'Espagne. Le rapport, référencé CESI n. A8008164 a été présenté à Paris et à Gérone lors des réunions du 31 Mars 2008 et du 1 Avril 2008 respectivement. Un rapport de synthèse a été demandé lors de la réunion de Paris, afin de rassembler de la façon la plus claire possible les caractéristiques, les avantages et les inconvénients des options technologiques les plus intéressantes. C'est le but du présent cahier.

2 COMPARAISON DES SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES

Les tableaux suivants résument les principales conclusions du rapport CESI n. A8008164 relatif aux principales options technologiques envisageables pour la réalisation d'une nouvelle liaison électrique en très haute tension entre la France et l'Espagne, et en particulier :

- La ligne électrique aérienne
- La ligne électrique enterrée alimentée en courant alternatif
- La ligne électrique enterrée alimentée en courant continu

Nota : une réalisation mixte souterraine – sous-marine en courant continu a des propriétés similaires à celle d'une réalisation enterrée en courant continu, avec un coût notablement plus élevé. Les caractéristiques spécifiques à cette solution sont précisées dans les tableaux suivants, en tant que de besoin.

Les tableaux ne prennent pas en compte la ligne mixte partiellement aérienne et partiellement enterrée, car ses caractéristiques sont celles des deux premières technologies mentionnées, pour la partie aérienne ou souterraine (en courant alternatif) correspondante.

Le code de couleurs utilisé dans les tableaux de comparaison est le suivant :

- Les cases à fond vert se réfèrent à des caractéristiques retenues favorables pour la technologie considérée ;
- Les cases à fond rouge se réfèrent à des caractéristiques retenues défavorables pour la technologie considérée ;
- Les cases à fond jaune se réfèrent à des caractéristiques retenues intermédiaires pour la technologie considérée
- Les cases à fond bleu reportent des paramètres numériques neutres, sans expression de jugement.

On résume les comparaisons suivantes :

- Tableau 1 : puissance transitée
- Tableau 2: dimensions physiques des ouvrages
- Tableau 3 : aspects liés à la conduite et l'évolution du système électrique
- Tableau 4 : emprise en phase chantier
- Tableau 5 : emprise permanente
- Tableau 6 : enjeux économiques
- Tableau 7 : aspects complémentaires liés à l'expérience précédente et à la fiabilité attendue
- Tableau 8 : possibilité d'intégration avec d'autres infrastructures

Les comparaisons fournies dans ce document concernent exclusivement le cas de lignes de grand transport d'électricité, c'est à dire le cas de lignes à 400 kV ou transitant des puissances analogues.

En synthèse finale on peut affirmer les éléments suivants sur l'état de l'art :

- La technologie aérienne est bien établie et quasi exclusivement utilisée (dans 99,5 % du réseau de tension supérieure ou égale à 380 kV) pour des longueurs de ligne même très importantes
- La technologie enterrée en courant alternatif est bien établie pour des longueurs de ligne jusqu'à quelques dizaines de kilomètres, même si cette solution est actuellement utilisée seulement en des cas exceptionnels en raison de son coût très élevé;
- La technologie enterrée en courant continu est bien établie pour des longueurs de ligne même très importantes. La plupart des exemples sont concentrés sur des liaisons sous-marines, où il s'agit bien souvent de la seule technologie disponible, ou terrestres (lignes aériennes en courant continu) ; les exemples de liaisons terrestres souterraines restent exceptionnels en raison du coût très élevé. Cette technologie est aussi utilisée pour connecter entre eux des réseaux électriques à fréquence différente ou sans synchronisme (comme par exemple en Amérique Latine).

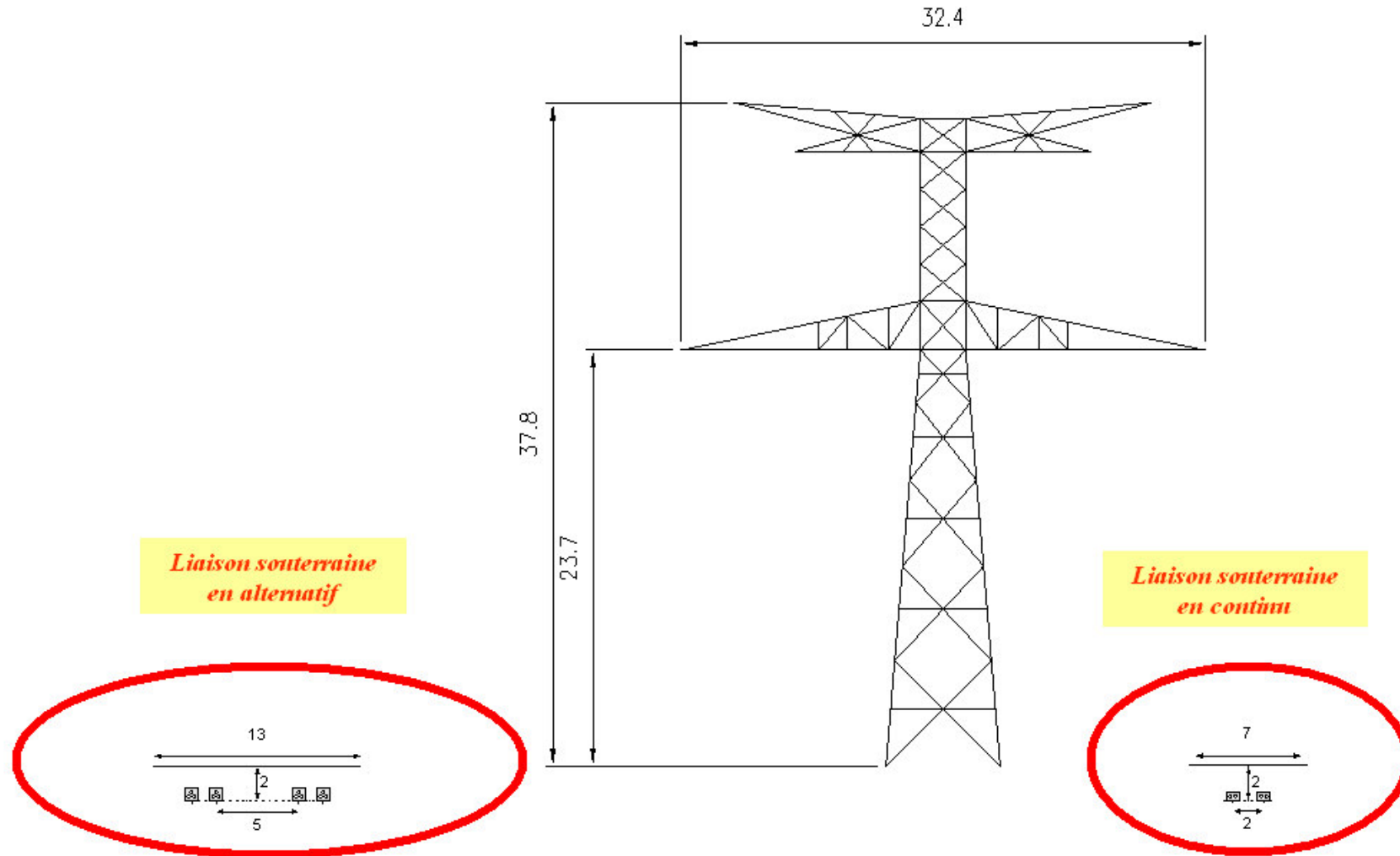
Tab. 1: comparaison de puissance transitée entre les différentes alternatives

Technologie	Install.	Configuration	Nb de câbles / phase	Puissance (MVA / circuit)
Aérien	-	-	3	2000 à 2.200
Câble Souterrain en alternatif	Enterré	Pose en trèfle	1	1.100
			2	2.170
		Pose en nappe	1	1.160
			2	2.250
	En tunnel ou en galerie	Pose verticale 1 tunnel	1	1.700

POUR OBTENIR UNE PUISSANCE TRANSITEE EQUIVALENTE A CELLE D'UNE LIGNE AERIENNE DOUBLE TERNE, IL EST NECESSAIRE D'INSTALLER, EN SOUTERRAIN ALTERNATIF, DEUX CIRCUITS A DOUBLE TRICABLE

En revanche, en courant continu, 4 câbles (2 bipôles) suffisent pour obtenir une capacité d'interconnexion comparable

Tab. 2 : comparaison de dimensions physiques entre les différentes alternatives : ligne aérienne en courant alternatif et câble souterrain en courant alternatif



Nota : on peut éventuellement « dédoubler » la liaison souterraine et rendre chaque liaison indépendante, prenant ainsi moins de place

Nota 2 : les dimensions physiques indiquées se réfèrent aux pylônes normalisés français ; les pylônes normalisés espagnols ont une largeur moins importante (17,30 m)

Tab. 3 : comparaison d'aspects liés à la conduction et évolution du réseau pour les différentes alternatives

	Ligne aérienne	Liaison souterraine en courant alternatif	Liaison souterraine en courant continu
Possibilité d'augmenter la capacité a posteriori	<input checked="" type="checkbox"/> Jusqu'à 30% pour les câbles CEE, et 60 % pour les câbles ACSS	<input checked="" type="checkbox"/> Très limitée	<input checked="" type="checkbox"/> Très limitée <input checked="" type="checkbox"/> Flux contrôlé par opérateur
Possibilité de surcharge	<input checked="" type="checkbox"/> Très limitée: 10% pendant quelques minutes	<input checked="" type="checkbox"/> 200% pendant quelques dizaines d'heures <input checked="" type="checkbox"/> Vieillessement accéléré	<input checked="" type="checkbox"/> Non permise <input checked="" type="checkbox"/> Flux contrôlé par opérateur
Compensation du réactif	<input checked="" type="checkbox"/> Aucune	<input checked="" type="checkbox"/> à partir de 25 à 30 km <input checked="" type="checkbox"/> 25 MVAR/km	<input checked="" type="checkbox"/> Aucune

Nota: certains gestionnaires de réseau n'admettent aucune surcharge sur les liaisons en câbles

Nota 2 : certains gestionnaires de réseau compensent le réactif à partir de 10-15 km.

Tab. 4 : comparaison d'emprise de chantier pour les différentes alternatives

	Ligne aérienne	Liaison souterraine en courant alternatif	Liaison souterraine en courant continu
Emprise de chantier	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> 800 m²/pylône <input checked="" type="checkbox"/> 1 pylône tous les 400 à 500 m 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Chantier continu sur longueur 1.5km <input checked="" type="checkbox"/> Chantier sur front largeur 15 - 25 m <input checked="" type="checkbox"/> compensation réactif à chaque extrémité puis tous les 25 – 30 km 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Même longueur de chantier, mais largeur de front réduite à 10 - 15 m <input checked="" type="checkbox"/> Chantier important pour postes de conversion alternatif continu aux extrémités
Vitesse d'avancement	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> 60 jours / pylône au total, par opérations non continues 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> 50-100 m/jour en rural par tranchée, sans obstacle majeur 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> 50-100 m/jour en rural par tranchée, sans obstacle majeur
Impacts de chantier	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Engins terrassement, poussière et bruit ponctuellement (au niveau des pylônes) <input checked="" type="checkbox"/> Pistes 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Engins terrassement (terrassement en continu) <input checked="" type="checkbox"/> Poussière <input checked="" type="checkbox"/> Bruit 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Engins terrassement (terrassement en continu) <input checked="" type="checkbox"/> Poussière <input checked="" type="checkbox"/> Bruit

Nota : pour une liaison sous-marine, l'avancement du chantier et les impacts sont fonction de la technique de pose, de la profondeur de pose, et de la nature des fonds sous-marins.

Tab. 5 : comparaison d'emprise permanente pour les différentes alternatives

	Ligne aérienne	Liaison souterraine en courant alternatif	Liaison souterraine en courant continu
Utilisation du terrain	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> 250 m²/pylône <input checked="" type="checkbox"/> 1 pylône tous les 400 à 500 m <input checked="" type="checkbox"/> Cultures de hauteur limitée par endroits 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> sur 5-6 m de largeur limitation aux cultures <input checked="" type="checkbox"/> 1 jonction/700 à 1000m <input checked="" type="checkbox"/> Emprise limitée si tracé longe une route/voie ferrée 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> sur 5-6 m limitation aux cultures <input checked="" type="checkbox"/> 1 jonction/700 à 1000m <input checked="" type="checkbox"/> Emprise limitée si tracé longe une route/voie ferrée
Impact sur milieu naturel	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Ponctuel, à chaque pylône <input checked="" type="checkbox"/> Avifaune si pas de dispositif adapté 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Impact lié à tracé continu <input checked="" type="checkbox"/> Biodiversité détruite et écoulement des eaux perturbé 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Impact lié à tracé continu <input checked="" type="checkbox"/> Biodiversité détruite et écoulement des eaux perturbé
Impact visuel	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Important 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Peu élevé, mais fonction de la tranchée et de sa cicatrisation 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Câbles : Peu élevé, mais fonction de la tranchée et sa cicatrisation <input checked="" type="checkbox"/> Postes: important
Emprise des postes	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> 800 m²/circuit 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> 800 à 1000 m²/circuit <input checked="" type="checkbox"/> 3000 m²/poste de compensation 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> 35 000 – 50 000 m² par poste de conversion (ref. 1400 MW)

Nota : pour une liaison sous-marine, l'emprise est identique à la solution terrestre en continu, l'impact visuel est nul pour la partie sous-marine, mais potentiel sur le milieu naturel.

Tab. 6 : comparaison d'enjeux économiques pour les différentes alternatives

	Ligne aérienne	Liaison souterraine en courant alternatif	Liaison souterraine en courant continu
Coûts d'investissement	<ul style="list-style-type: none"> ☑ 0.6-1 M€/km en plaine ☑ 1,5-2 M€/km en montagne 	<ul style="list-style-type: none"> ☑ 4-8 M€/km double tri câble sans obstacles (*) ☑ Coûts en cas d'obstacles à évaluer pour situation spécifique ☑ Compensation courant capacitif: 150 k€/km de câble 	<ul style="list-style-type: none"> ☑ Postes de conversion (deux postes) : 200-230 k€/MW: pour liaison 1400MW coût total postes de conversion: env. 300M€ ☑ Ligne en câble enterré : 1 M€/km sans obstacles ☑ Coûts en cas d'obstacles à évaluer pour situation spécifique
Coûts du terrain	Aspect important: à étudier dans chaque cas		
Coûts de gestion	☑ 2 à 3% des Coûts d'Investissement (CI)	☑ 1,5 à 2% CI	☑ 2,5% CI
Coûts des pertes	☑ 190 k€/km*an (4000MW)	☑ 100 k€/km*an (4000 MW)	☑ 90 k€/km*an (1400MW)
Coûts de démantèlement	☑ 0,05% CI	☑ 0,08% CI	☑ 0,04% CI

(*)Dans le cas de liaison souterraine en courant alternatif il est nécessaire d'installer deux double-tri câbles (12 câbles).

Tab. 7: comparaison d'aspects complémentaires (expérience précédente et fiabilité attendue) pour les différentes alternatives

	Ligne aérienne	Liaison souterraine en courant alternatif	Liaison souterraine en courant continu
Expérience précédente	<ul style="list-style-type: none"> ☑ Technologie bien maîtrisée 	<ul style="list-style-type: none"> ☑ Technologie bien maîtrisée sur de courtes distances 	<ul style="list-style-type: none"> ☑ Technologie bien maîtrisée
Fiabilité attendue	<ul style="list-style-type: none"> ☑ Bien maîtrisée: ☑ Nombre de déclenchements (ND) élevé de courte durée ☑ Possibilité de ré-enclenchement automatique (REA) ☑ Délai de réparation de quelques heures à quelques jours 	<ul style="list-style-type: none"> ☑ Assez bien maîtrisée (les points faibles sont les jonctions) ☑ ND très limité; durée de réparation très élevée (plusieurs semaines) ☑ REA non possible 	<ul style="list-style-type: none"> ☑ Bien maîtrisée ☑ ND très limité; durée de réparation très élevée ;

Tab. 8: comparaison de synergies avec les ouvrages existants pour les différentes alternatives

	Ligne aérienne	Liaison souterraine en courant alternatif	Liaison souterraine en courant continu
Dépassement d'obstacles	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Traversée de routes: bien maîtrisée et aisée <input checked="" type="checkbox"/> Traversée de rivières: bien maîtrisée et aisée <input checked="" type="checkbox"/> Traversée de montagnes: bien maîtrisée bien que parfois difficile 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Traversée de routes: bien maîtrisée et aisée <input checked="" type="checkbox"/> Traversée de rivières: maîtrisée (ensouillage, fonçage ou forage) <input checked="" type="checkbox"/> Traversée de montagnes: pose en tunnel complexe 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Traversée de routes: bien maîtrisée et aisée <input checked="" type="checkbox"/> Traversée de rivières: maîtrisée (ensouillage, fonçage ou forage) <input checked="" type="checkbox"/> Traversée de montagnes: pose en tunnel complexe
Intégration dans les ouvrages existants	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Possibilités de regroupement géographique avec d'autres infrastructures <input checked="" type="checkbox"/> Routes: aucune synergie <input checked="" type="checkbox"/> Chemins de fer: aucune synergie <input checked="" type="checkbox"/> Ponts: aucune synergie <input checked="" type="checkbox"/> Tunnels: aucune synergie 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Routes: utilisation possible de l'emprise <input checked="" type="checkbox"/> Chemins de fer: utilisation possible de l'emprise de la voie <input checked="" type="checkbox"/> Ponts: possibilité d'intégration dans la structure <input checked="" type="checkbox"/> Tunnels: difficile si tunnel non initialement prévu à cet effet 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Routes: utilisation possible de l'emprise <input checked="" type="checkbox"/> Chemins de fer: utilisation possible de l'emprise de la voie <input checked="" type="checkbox"/> Ponts: possibilité d'intégration dans la structure <input checked="" type="checkbox"/> Tunnels: difficile si tunnel non initialement prévu à cet effet

3 IMPACT ENVIRONNEMENTAL D'UN NOUVEL AXE ENTRE LA FRANCE ET L'ESPAGNE

Lors de l'étude effectuée par CESI en 2002 en vue du débat public (rapport CESI n. A2/038822), nous avons fait une analyse visant à replacer dans le contexte local, ne fut-ce qu'en toute première approximation, les impacts potentiels que chacune des technologies prises en compte (aérienne, souterraine, sous marine) aurait sur l'environnement local (en particulier du côté français) si elle était appliquée pour la réalisation de la nouvelle ligne. Pour ce faire nous avons étudié le contexte territorial du point de vue physique, naturel et humain et nous avons mis en relation ces données avec l'impact spécifique de chacune des technologies prises en compte pour en déduire des cartes thématiques. En tenant compte de l'évolution que le territoire a subi entre temps (en particulier la construction de la voie ferrée de la ligne à grande vitesse) et du fait que l'analyse ne considérait que la partie française de la nouvelle interconnexion électrique envisagée, nous allons reprendre quelques uns des aspects qui sont à la base de l'évaluation des impacts environnementaux afin de donner quelques informations comparatives supplémentaires sur les principales technologies envisagées dans le contexte plus précis de la région prise en compte. L'intention est d'aider à sélectionner le type de technologie qui pourrait être envisagée pour la réalisation de la nouvelle ligne, tout en sachant que des études bien plus approfondies devront être effectuées lors de la recherche des couloirs et des parcours.

3.1.1 Milieu physique, naturel et humain

Une carte de relief de la région est montrée dans la Figure 1. On y remarque :

- Du côté français de la frontière :
 - Prédominance d'un relief plat et bas: la zone concernée est située en plaine du Roussillon, traversée d'Ouest en Est par la Têt (au Nord) et le Tech (au Sud). Quelques ondulations se forment en partie Sud (contreforts des Aspres), aux environs du Boulou.
 - La vallée du Tech, au Sud, est à peine plus pentue : Céret est à 150 m d'altitude, Le Boulou à 80 m.
 - La chaîne des Albères en partie Sud, culmine à une altitude assez élevée sauf au niveau du Col du Perthus (altitude 300 m environ), sorte de trouée dans la barrière montagneuse orientée est-ouest, dont les sommets atteignent 1250 m à une distance de 7 km à l'est du Col, et qui monte en pente plus douce à l'ouest pour atteindre une altitude de 800 m à une distance de 7 km du Col.
- Du côté espagnol de la frontière :
 - Dans la zone Nord et Ouest on peut remarquer la présence de territoires ayant une topographie variée, avec de vallonnements importants en prévalence orientés dans la direction Ouest-Est, qui, même s'ils n'atteignent pas des élévations très importantes, sont séparés par des escarpements raides et intriqués ; la vue du satellite reportée en Figure 2 montre les environs de La Jonquera
 - La zone au Sud et à l'Est est caractérisée par un relief de collines plus doux qui débouche progressivement sur une plaine basse sillonnée de petites rivières dont la direction principale, initialement orientée Nord-Sud plie progressivement vers la mer, dans le sens Ouest-Est.
- La complexité de la morphologie de la chaîne des Pyrénées se prolonge dans la mer par la présence de failles de fond : le plateau continental sous marin présente des canyons qui portent à une très brève distance de la côte des profondeurs importantes : en particulier on peut remarquer le Cabo Creus, canyon qui se trouve en face du cap de Creus, et qui porte à une distance de moins de 6 km de la côte une profondeur de fond de presque 500 m (ligne isobathe jaune dans la Figure 3)

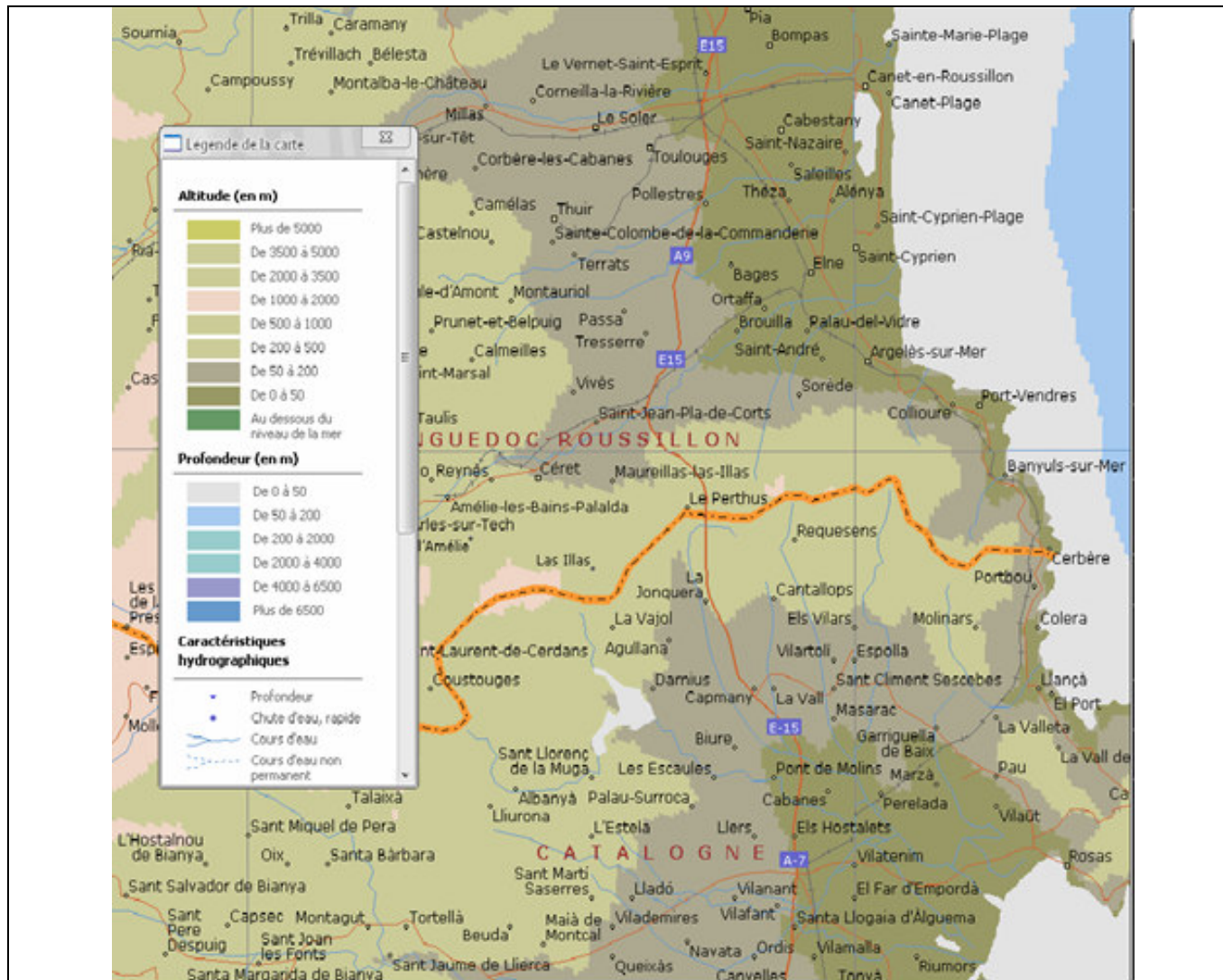


Figure 1 : carte de relief de la frontière orientale entre la France et l'Espagne

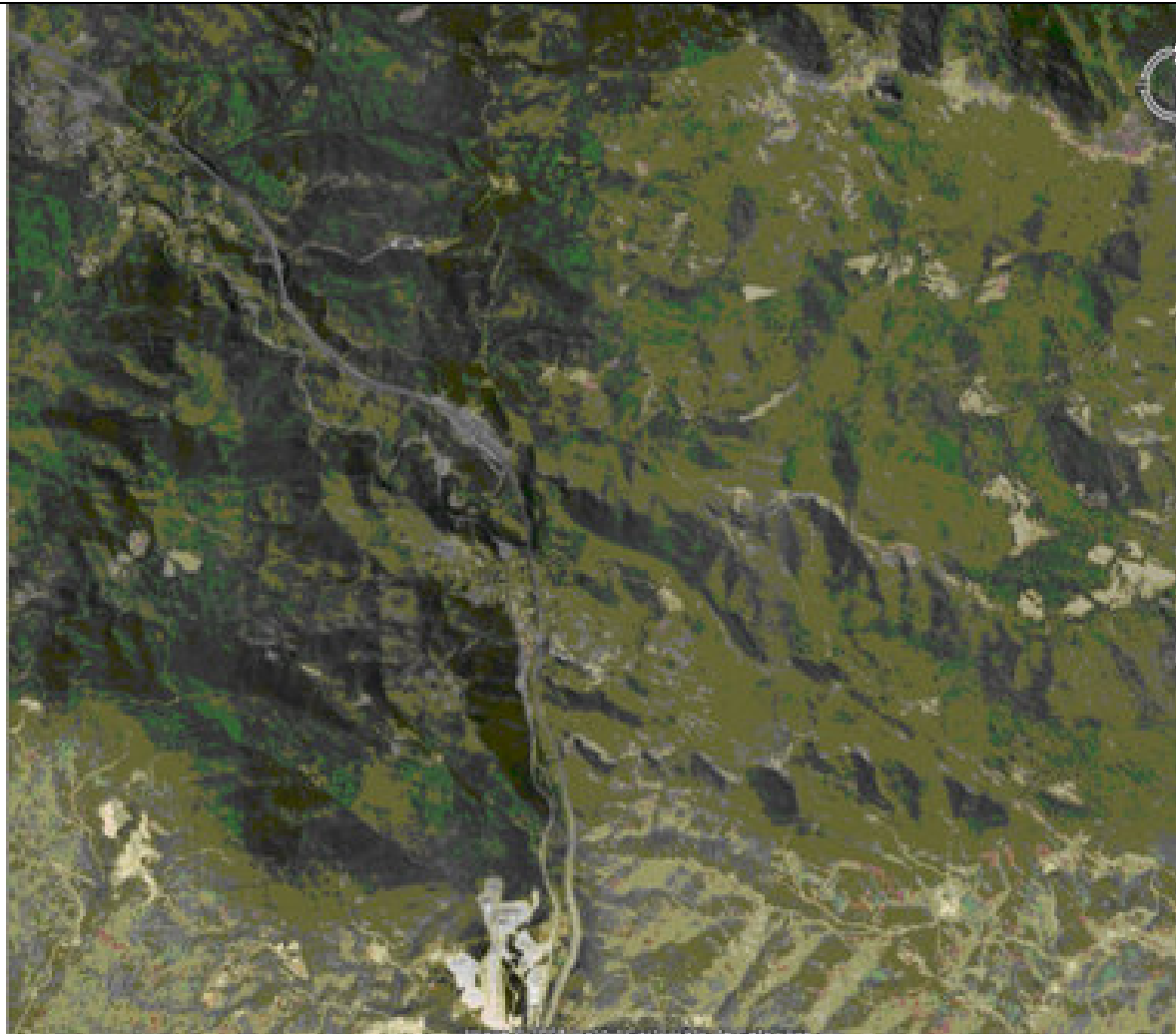


Figure 2 : vue du satellite de la partie espagnole de la frontière

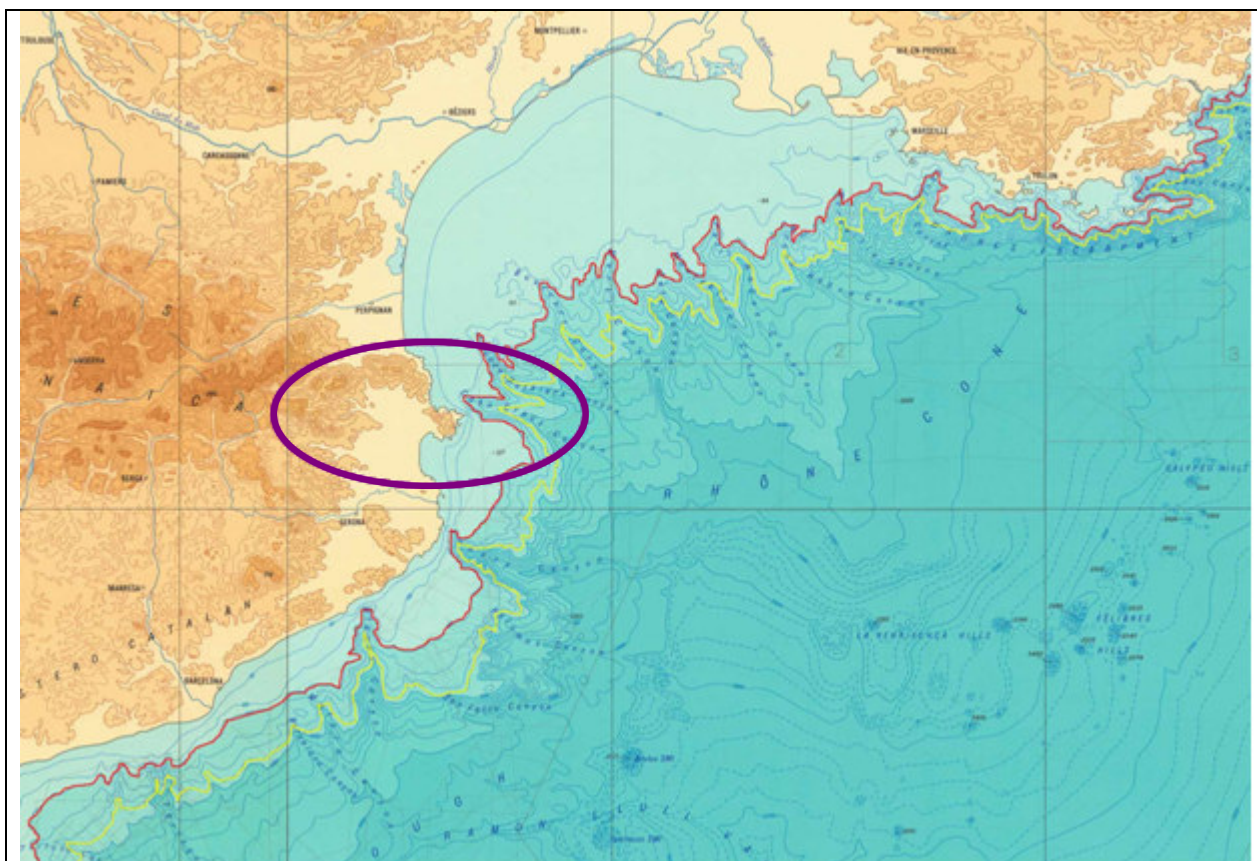


Figure 3 : Carte des fonds maritimes

L'analyse de l'occupation du sol, de la végétation et du paysage, conduite sur la base des données d'occupation du sol *Corine land cover*, montre trois zones caractéristiques :

- **Les zones de montagne**, caractérisées principalement par une couverture forestière quasi-continue (Hêtraie, boisements de Douglas et de différents Abies, Pins Laricio) ; le châtaignier domine, avec quelques secteurs de bas de versants recouverts de maquis à bruyères, genêts et cistes associés au chêne vert.
- **La plaine**, où le paysage, du côté français en particulier, est caractérisé par la présence dominante de la vigne; s'y associent des cultures de diversification, encouragées par les mesures d'arrachage de la vigne préconisées par l'Union européenne. Les autres cultures sont essentiellement des cultures maraîchères ou fruitières. La diversification fruitière ou maraîchère est localisée aux secteurs présentant de bonnes possibilités d'irrigation.
- **La frange littorale**, où se développent les plages touristiques de plus en plus aménagées, caractérisées elles aussi par quelques vignobles localisés (vins des Sables), mais aussi par pinèdes, oyats.

En ce qui concerne l'urbanisation on peut remarquer, du côté français (voir carte Figure 4):

- une assez forte concentration sur une bande qui s'étire le long de la Têt, aussi bien en rive gauche qu'en rive droite, avec un chapelet de villages en suite quasiment ininterrompue mais avec une densité d'habitat qui a tendance à diminuer en s'éloignant de Perpignan vers l'ouest.
- une absence d'habitations au nord de cette bande, où les terrains sont essentiellement consacrés à la culture de la vigne.
- un habitat assez clairsemé mais très réparti dans une assez large bande au sud de la Têt, qui correspond assez bien aux zones de cultures maraîchères et fruitières dans la vallée de la Têt.

- en allant vers le sud, l'espacement entre villages augmente ;
- plus vers le sud, quelques villages se situent vers le goulot d'étranglement où la ligne TGV, autoroute et RN 9 se concentrent.
- à l'arrivée sur la vallée du Tech, on retrouve à nouveau une forte concentration du bâti ; il s'étend dans la vallée du Tech, et reste situé au piémont de la chaîne des Albères.
- à l'extrême sud, le bâti reste essentiellement concentré dans la trouée qui monte vers le Col du Perthus.

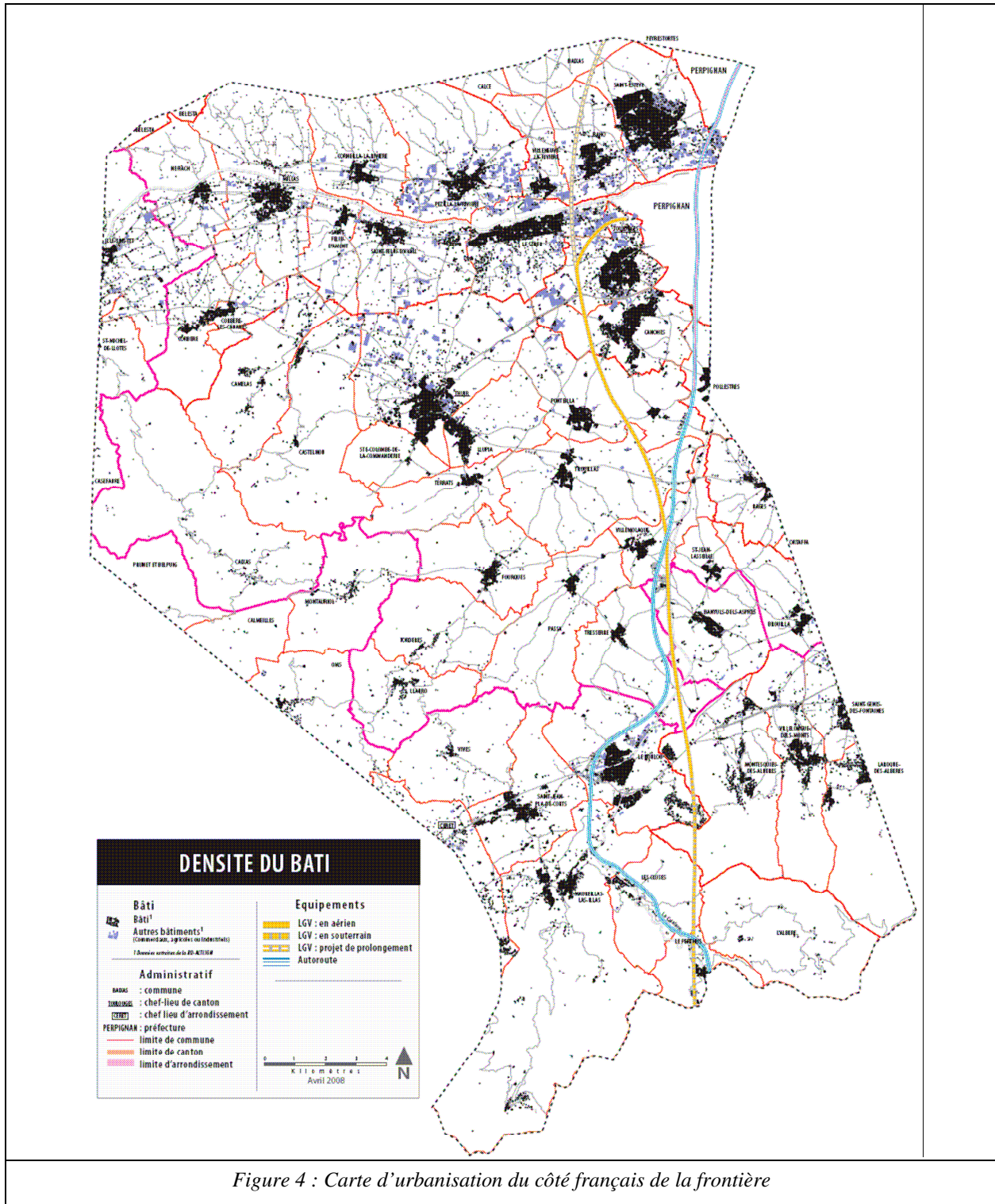


Figure 4 : Carte d'urbanisation du côté français de la frontière

Du côté espagnol (voir carte Figure 5) :

- la seule zone de concentration importante est localisée autour de la ville de Figueras, en forte expansion récente ;
- pour le reste on remarque la présence de petites villes et de villages clairsemés et de quelques rares habitations isolées, surtout dans les plateaux de montagne.

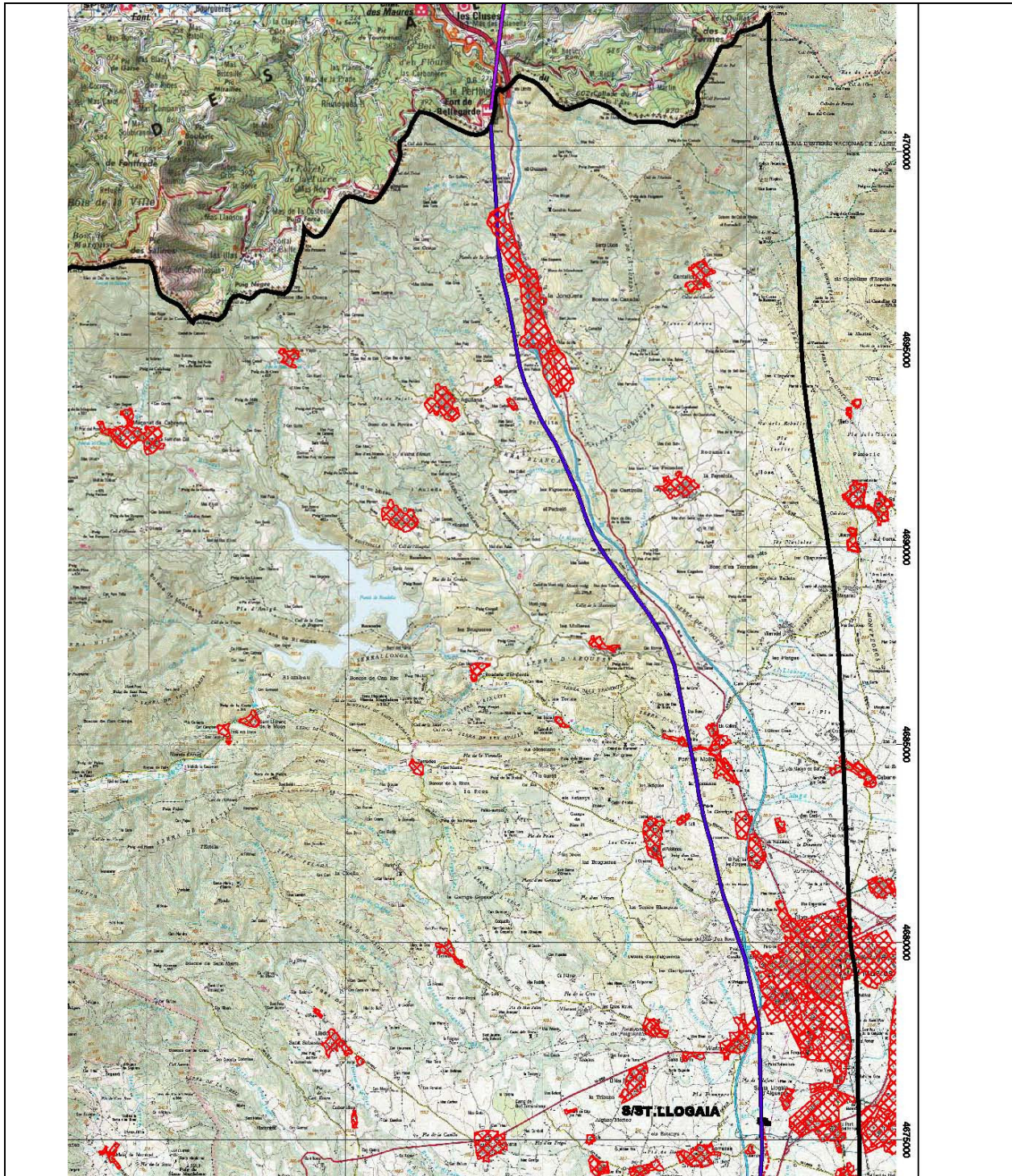


Figure 5 : Carte d'urbanisation du côté espagnol de la frontière

Du point de vue du milieu naturel, la région orientale des Pyrénées est d'un intérêt certain. En effet nombreux sont les sites classés dans le cadre de Natura 2000.

Du côté français nous citons :

- Sites d'Importance Communautaire :
 - FR9101463 COMPLEXE LAGUNAIRE DE SALSES
 - FR9101465 COMPLEXE LAGUNAIRE DE CANET
 - FR9101475 MASSIF DU CANIGOU
 - FR9101476 CONQUE DE LA PRESTE
 - FR9101478 LE TECH
 - FR9101481 COTE ROCHEUSE DES ALBERES
 - FR9101483 MASSIF DES ALBERES;
- Zones de Protection Spéciale :
 - FR9110076 PY, MANTET ET PRATS DE MOLLO
- Site du Domaine Maritime proposé pour devenir un Site d'Importance Communautaire
 - FR9101482 POSIDONIES DE LA COTE DES ALBERES

Le ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire a réalisé un site Internet (<http://natura2000.environnement.gouv.fr/>) pour rendre accessibles au public les informations sur la contribution française à la constitution du réseau Natura 2000. La carte de Figure 6 permet de situer les sites d'importance.

Du côté espagnol il faut relever que pratiquement toute la région qui côtoie la frontière locale avec la France est classée comme zone d'importance environnementale. En particulier il faut citer le site de Les Salines à l'Ouest et celle du Massif des Albères à l'Est (les deux sont classés Sites d'Importance Communautaire et Zone d'Intérêt pour la Conservation des Oiseaux [ZICO]). Ces zones protégées forment une ceinture continue qui s'interrompt seulement au col de la Jonquera. Plus au Sud il faut citer les zones protégées deinya Segats de la Muga (SIC et ZICO) et la Garriga d'Empordà (SIC et ZICO). Dans le cadre du réseau Natura 2000, les Bassins de l'Albera (SIC) et le cours de la rivière Llobregat de l'Empordà (SIC). Il faut enfin signaler, plus près de la zone côtière, le parc naturel de Aiguamolls de l'Empordà (SIC et ZICO), une zone marécageuse de grande importance ornithologique qui constitue un habitat à forte concentration d'oiseaux et vers laquelle convergent les axes migratoires à travers la chaîne des Pyrénées

La carte de Figure 7 permet de situer les sites d'importance communautaire.

Du point de vue des infrastructures il faut citer :

- L'autoroute A9 du côté français qui devient AP-7 au-delà de la frontière espagnole
- La route nationale N9 qui devient CN II après la frontière ;
- L'axe ferroviaire Perpignan, Gérone, Barcelone
- Le nouvel axe ferroviaire à grande vitesse (TGV) en phase de réalisation
- La ligne électrique à très haute tension entre le poste de Baixas (en France) et le poste de Vic (en Espagne) dont le tracé, dans sa partie initiale, est compris dans la zone d'intérêt pour la présente étude.

Les couloirs que tracent toutes ces infrastructures peuvent être pris en considération quand on pense au tracé d'une nouvelle ligne.

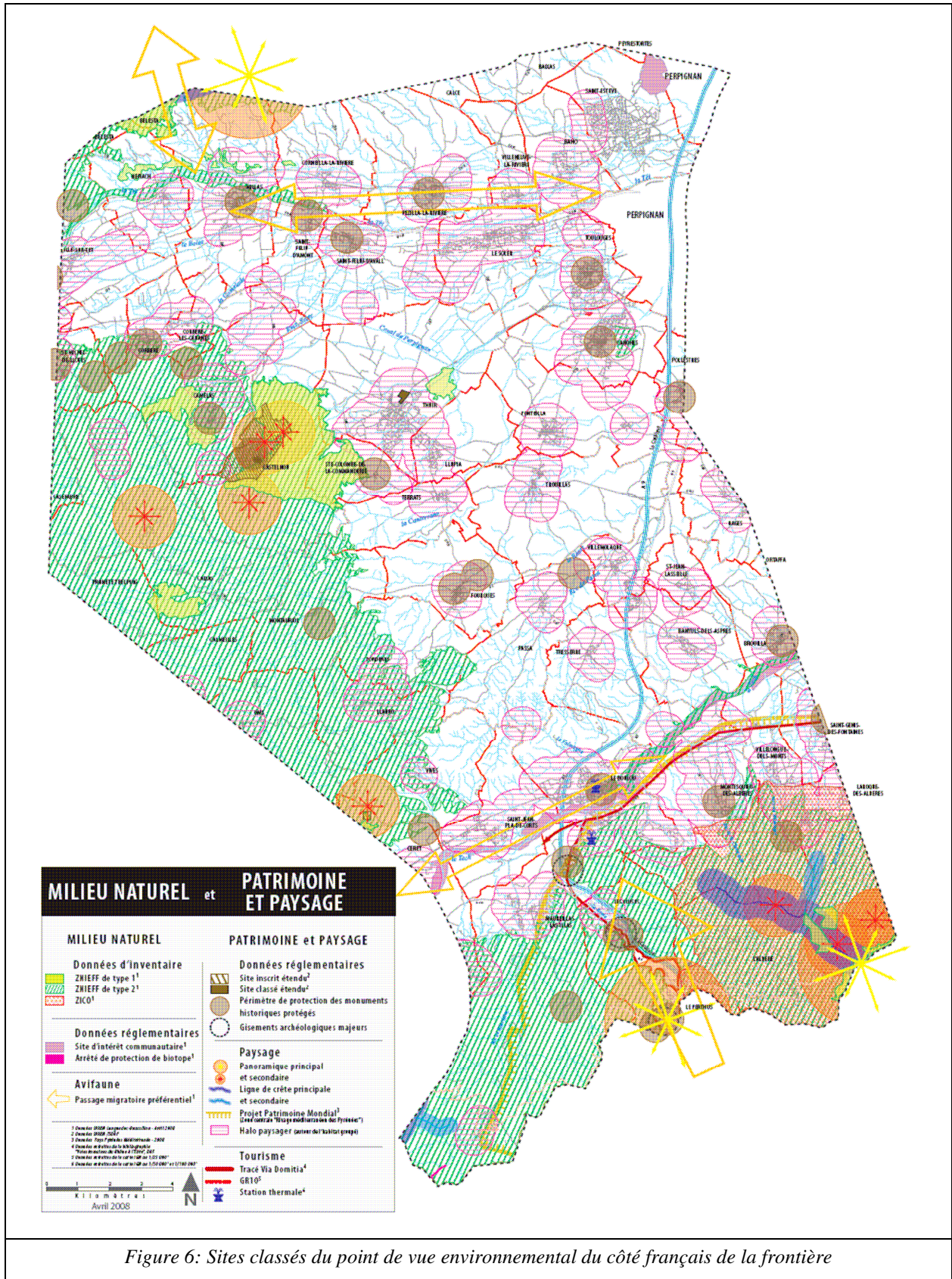


Figure 6: Sites classés du point de vue environnemental du côté français de la frontière



Figure 7: Sites classés du point de vue environnemental du côté espagnol de la frontière

3.1.2 Les impacts de la technologie aérienne en courant alternatif

Utilisation du terrain

L'utilisation du terrain en présence de lignes aériennes est limitée par deux aspects principaux :

- La présence des pylônes autour desquels il est nécessaire de préserver une surface d'environ 250m² de terrain virtuellement libre ;
- La présence des conducteurs le long de tout le parcours: ceux-ci se trouvent à une hauteur variable par rapport au terrain en fonction de la hauteur des pylônes et de la position le long de la portée ; pour des raisons de sécurité (pour éviter tout contournement électrique) il est nécessaire de maintenir entre toute structure et les conducteurs une distance minimale. Ceci impose des précautions minimales pour une utilisation du terrain à des fins agricoles, et des cultures ayant une hauteur limitée le long du couloir qui se trouve sous l'emprise de la ligne. La présence de vignobles n'est pas incompatible avec celle des lignes aériennes de très haute tension. (voir Figure 8). Il faut remarquer qu'il est souvent possible d'adopter des mesures préventives qui permettent d'atténuer ces contraintes d'utilisation de terrain.

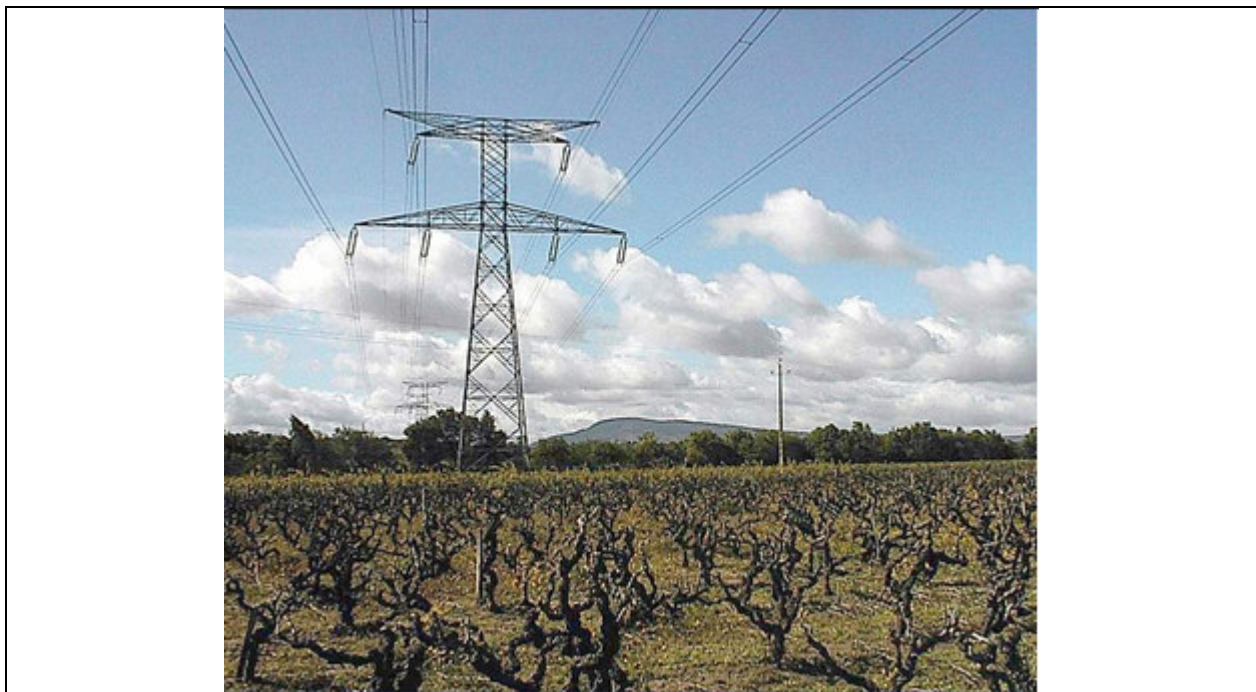


Figure 8: vignobles sous une ligne 400kV

Milieu naturel :

L'impact d'une ligne électrique sur la flore est lié à la nécessité de déboiser et à la limitation des espèces végétales qui peuvent y être cultivées. L'importance de ces impacts est plus grande si la ligne traverse une zone protégée. Du côté français il serait aisé de choisir un tracé qui ne côtoie ni ne traverse de zone protégée, tandis que sur le versant espagnol la continuité des espaces protégés limiterait les choix de parcours. En tout cas, l'adoption de mesures préventives rendrait possible la réduction des impacts sur la végétation, avec la possibilité d'éliminer la tranche déboisée et de rendre compatible dans la plus grande mesure possible la ligne et les formations forestières

Parmi les impacts potentiels sur la faune le plus significatif est celui qui intéresse les oiseaux, et qui est caractérisé par la possibilité de collision entre les oiseaux et la ligne, le danger de court-circuits pour les espèces à grande envergure et la dégradation des aires de nidification. Il faut remarquer que l'axe d'une

ligne aérienne entre la France et l'Espagne se développerait perpendiculairement à celui du parcours préférentiel de migration des oiseaux. On remarquera à ce sujet que les distances entre les conducteurs d'une ligne 400 kV sont tellement élevées qu'elles rendent pratiquement impossible l'électrocution des oiseaux, de plus il existe des dispositifs qui permettent de limiter très significativement le risque de collision des oiseaux.

Impact visuel

L'impact visuel est certainement la contrainte environnementale majeure des lignes aériennes. Les pylônes et les conducteurs peuvent être visibles à de très grandes distances, surtout lorsqu'ils sont placés le long d'arêtes de montagnes ou collines ou lorsque ils apparaissent contre un fond clair, comme celui du ciel. Il est possible d'utiliser des techniques d'intégration qui permettent d'atténuer l'impact visuel. Dans le cas considéré dans notre étude, la présence d'autres ouvrages à développement linéaire (ligne TGV, autoroute A9/AP7 etc.) permet de fait de mieux supporter l'impact visuel. De plus, la recherche de tracés permettant la coexistence avec l'agriculture et les forêts permet aussi de diminuer l'impact (des files d'arbres, la lisière de bois). La même chose est valable pour la recherche de tracés au fond des vallées et à mi-côte en montagne qui permettent une visibilité réduite de la ligne, en mettant à profit l'appui visuel procuré par la végétation derrière l'ouvrage.

Champs électromagnétiques

Le profil de champs magnétique à 1 m du sol généré par une ligne à double circuit lors du transport d'un courant de 2000A par circuit est montré dans la Figure 9, en fonction de la hauteur des conducteurs par rapport au sol (effet de caténaire). Il est à remarquer que ce niveau, qui correspond ici à une ligne transitant l'IMAP (Intensité Maximale Admissible en Permanence) – ce qui n'est pratiquement jamais le cas - est inférieur au niveau maximum indiqué par la Communauté Européenne pour une exposition permanente du grand public (niveau de 100 μ T). Dans des conditions normales et moyennes du transit, les valeurs du champ magnétique sont notablement inférieures (6 μ T à l'aplomb de la ligne, 1,6 μ T à une distance de 30 m de l'axe, 0,2 μ T à une distance de 100 m de l'axe).

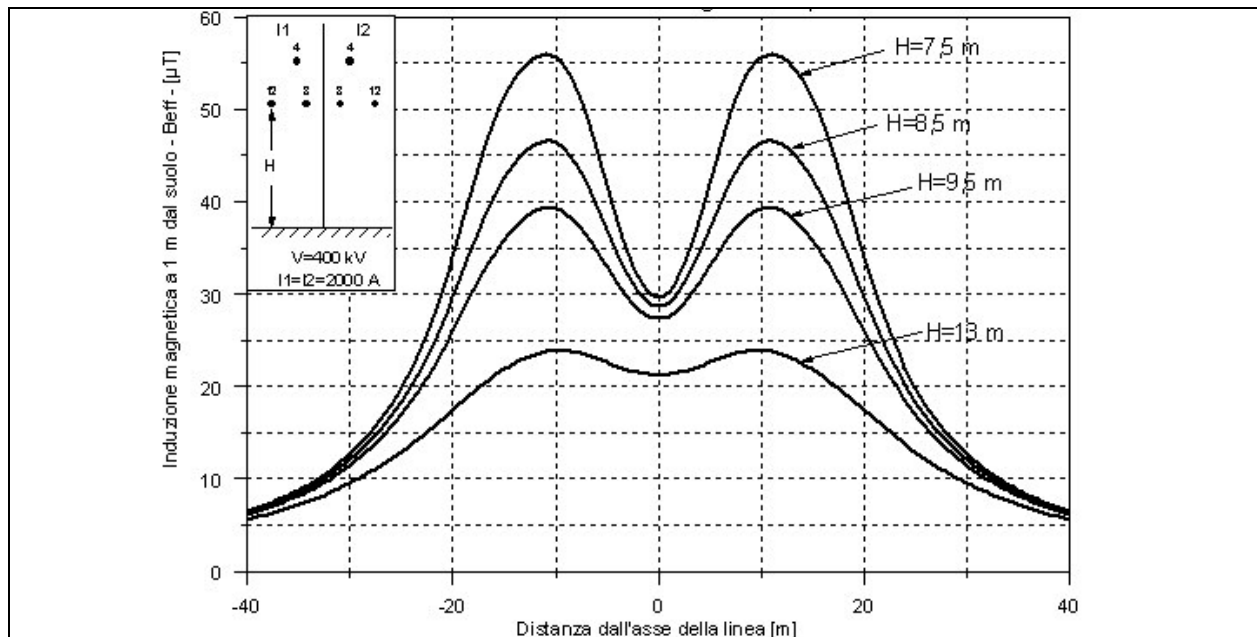


Figure 9: Profil de champs magnétique à 1 mètre du sol sous une ligne double terne 400kV lors de la circulation d'un courant de 2000A par circuit (capacité physique maximale de la ligne)

3.1.3 Les impacts de la technologie souterraine en courant alternatif

Utilisation du terrain

Les limitations à l'utilisation du terrain imposées par la présence d'une ligne en câble enterré sont liées au danger d'endommagement du câble qui pourrait être causé par des plantations ayant des racines profondes: la présence de racines à proximité des câbles peut endommager ceux-ci et provoquer un assèchement du sol qui perturbe la dissipation des pertes. Dans le cas particulier de la vigne, plusieurs niveaux de racines sont observés : il n'est pas rare de trouver des racines à plus de 2 mètres de profondeur qui s'insèrent dans une roche mère fissurée (jusqu'à 5 mètres). De très vieilles vignes avec un substrat adéquat peuvent puiser leur eau en saison sèche à des profondeurs bien supérieures à 5 m. La viticulture n'est donc pas compatible à l'aplomb des liaisons souterraines. Une végétation rase ou des cultures à faible enracinement sont tolérées. De plus, il faut rappeler qu'il est nécessaire d'occuper, lors des travaux de pose, une bande de terrain ayant une largeur de 15 à 25 mètres en terrain plat (en tenant compte de l'espace nécessaire pour les accumulations de terre, les bobines de câbles, etc), cette bande pourrait être plus importante en cas de dénivelé et en montagne (voir tracé en Espagne, et dans la traversée des Pyrénées en France).

Milieu naturel

Les lignes électriques enterrées ont un impact sur la flore et la végétation tant lors du chantier que pendant la phase de fonctionnement. En effet, lors de la réalisation de la ligne, on nécessite d'une surface de terrain « propre » (donc déboisement et perte temporaire de cultures agricoles) équivalente à la longueur du tracé par une largeur correspondante à l'aire de chantier, et, pendant la phase de fonctionnement, une limitation aux espèces végétales cultivables. L'énergie thermique générée par les pertes de la ligne peut provoquer un effet d'assèchement du terrain environnant ou, au contraire, favoriser l'érosion en cas d'inondations. L'importance de l'impact dépendra de la valeur des formations traversées (il faut remarquer qu'il y a de nombreuses formations classées habitat communautaire (Directive 92/43) dans la partie espagnole).

Sur la faune les impacts sont négligeables en phase de fonctionnement, alors qu'en phase de construction le passage des camions et les opérations de terrassement causent un dérangement pour la faune qui aura tendance à s'éloigner temporairement.

S'agissant d'une technologie en tranchée, il ne faut pas négliger les interférences avec les eaux superficielles et souterraines, surtout dans des zones à haute exploitation des nappes aquifères à des fins agricoles. Il faut remarquer que l'axe de la ligne se développe perpendiculairement à la direction privilégiée d'écoulement des eaux vers la mer. Il faut remarquer que la ligne TGV représente d'ores et déjà une trouée importante dans le milieu naturel. Celle-ci est bien visible dans le relevé satellitaire montré en Figure 10, dans lequel on voit le chantier en cours sur presque toute sa longueur. L'importance de l'emprise de la ligne TGV est montrée dans la vue de Figure 11. La présence de ce chantier représente une opportunité de création de synergie entre infrastructures sans générer aucun nouvel impact significatif sur l'environnement.

La traversée de cours d'eau d'une certaine importance peut constituer, en outre, un élément d'attention, non seulement d'un point de vue technique, mais aussi vis à vis des diverses utilisations possibles et vis à vis de la présence d'une faune aquatique.

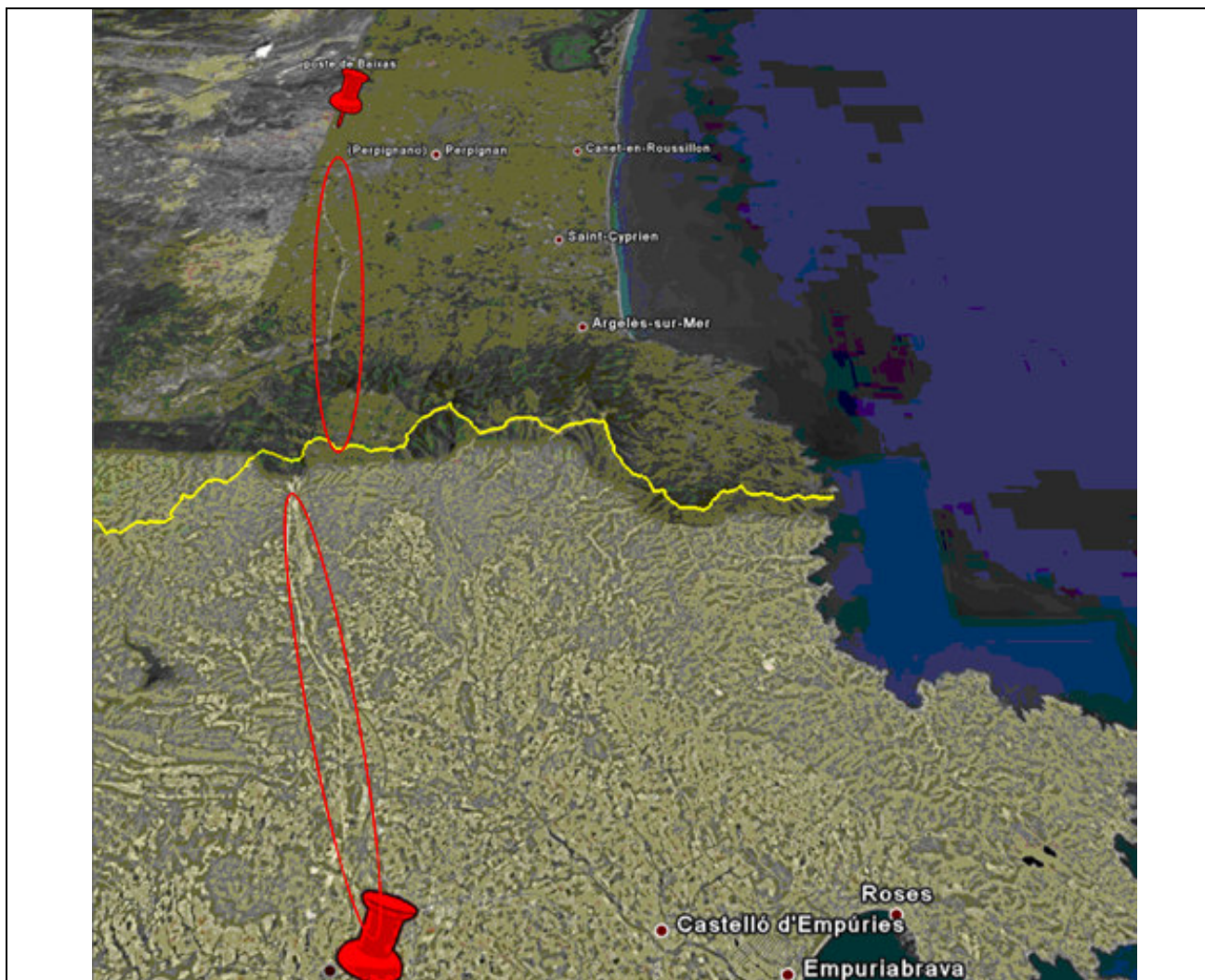


Figure 10: Vue du satellite de la région entre les postes de Baixas (France) et Sta Llogaia (Espagne). A remarquer la cicatrice visible du chantier de construction de la ligne TGV



Figure 11: Détail du chantier ligne TGV en zone française vu du satellite

Impact visuel

L'impact visuel est dû principalement aux nécessités de déboisement pour le chantier et à la création du couloir permanent à culture limitée.

D'autres sources d'impact visuel sont constituées par les postes d'extrémité et les éventuels postes de compensation qui occupent de 800-1000 m² et 3000m² respectivement avec une élévation pour le niveau de tension considéré d'environ 8 à 10 mètres. Ces postes sont normalement à l'extérieur et comprennent parfois des petits bâtiments de surveillance. Nettement moins importants sont les impacts des chambres de jonction qui jonchent le parcours des câbles tous les 700 à 1000 mètres. A cause de la présence de structures de support enterrées en béton la limitation de culture à ces endroits est encore plus importante, car il faut garantir l'inspection des accessoires à tout moment.

Dans le cas où le tracé de la ligne en câble enterré suivait celui de la ligne TGV l'impact visuel de cet ouvrage serait négligeable par rapport à celui de la ligne de la voie ferrée.

Enfin, il faut remarquer l'impact visuel important que procurent les stations de passage aérosouterrain (charpentes métalliques, supports et petits bâtiments, le tout sur 3 à 4000 m² environ) lors de la jonction entre partie aérienne et partie souterraine d'une ligne aérosouterraine

Champs électromagnétiques

Le profil de champ magnétique à 1 mètre du sol d'un circuit en câble enterré en double tricâble ayant une puissance transmise de 2000 MVA est montré dans la Figure 12. Les deux courbes font référence à deux configurations de connexions de phases agencées de telle sorte que l'induction magnétique soit le moins élevée possible. Il est à remarquer que le niveau maximum est inférieur à celui qui est indiqué par la Communauté Européenne pour une exposition permanente du grand public (niveau de 100 µT). A l'opposé de ce qui se passe pour la ligne aérienne, dans le cas du câble enterré le niveau de champ magnétique augmente au fur et à mesure qu'on approche du sol : en effet en s'approchant du sol on se rapproche aussi du câble, source du champ magnétique.

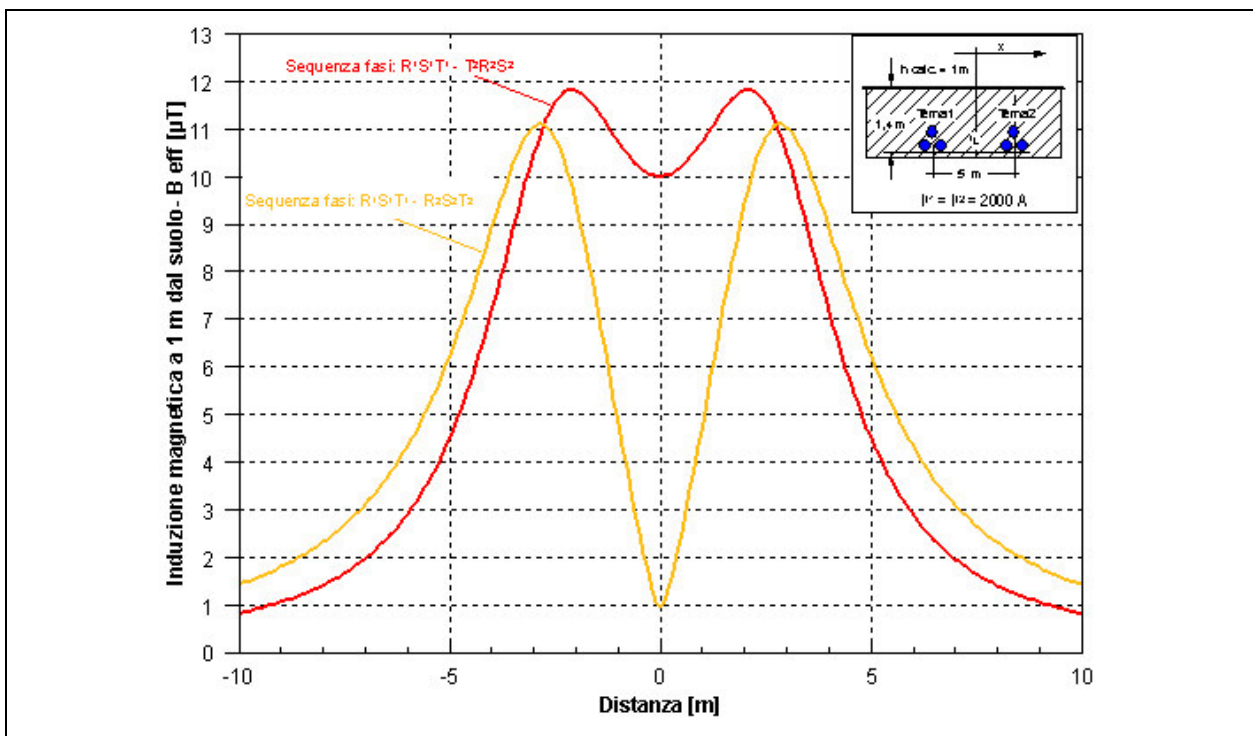


Figure 12: Profil de champs magnétique à 1 m du sol pour une ligne en câble enterré (double tricâble) en trèfle dans laquelle transite une puissance de 2000MVA (limite thermique de la configuration). Les deux courbes se réfèrent à deux séquences de connexion des phases

3.1.4 Les impacts de la technologie souterraine en courant continu

Utilisation du terrain

Les limitations à l'utilisation du terrain imposées par la présence d'une ligne en câble enterré en courant continu sont essentiellement les mêmes que celles qui ont été analysées pour le courant alternatif et se réfèrent essentiellement à la compatibilité des cultures le long du tracé du câble. Il faut néanmoins remarquer que le couloir d'emprise du câble en courant continu est nettement moins important que celui du câble en courant alternatif: en effet au lieu des 12 câbles (4 tricâbles) qui composent la connexion en courant alternatif, on peut se limiter à 4 câbles en courant continu.

Un obstacle important à l'utilisation du terrain est lié aux dimensions des postes de conversion qui se trouvent aux extrémités de la liaison. L'étendue de ces postes est d'environ 35000 à 50000 m². A titre d'exemple la Figure 13 montre le poste d'extrémité Nord de la liaison en courant continu entre la Norvège et les Pays Bas. Dans le cas qui nous intéresse des ouvrages semblables devraient être réalisés dans les postes de Baixas et de Santa Llogaia respectivement.



Figure 13: Chantier de construction du poste de conversion de la liaison en courant continu entre la Norvège et les Pays Bas réalisé en 2006

Du point de vue de la disponibilité d'espace pour la réalisation des postes de conversion, il faut constater, du côté français, que RTE ne dispose plus, aujourd'hui, d'aucune réserve foncière de sa propriété pour une nouvelle extension du poste de Baixas. Une extension du poste a déjà été réalisée en effet en 2006-2007 pour compléter la partie 400 kV et construire la partie nouvelle à 225 kV, afin de réaliser les lignes d'alimentation à 225 kV de la sous-station du Soler pour la ligne TGV. Toute nouvelle extension future du poste de Baixas nécessitera donc l'acquisition de terrain ; le poste se situe dans une zone très agricole (vignoble), sans aucune habitation. D'autre part, le poste est aujourd'hui encadré, sur trois de ses quatre côtés, par des routes ou chemins. Une extension de poste est donc possible dans l'absolu, mais conduira à des modifications de voirie en plus de l'acquisition des terrains supplémentaires.

La situation pourrait être différente dans le poste de Sta Llogaia.

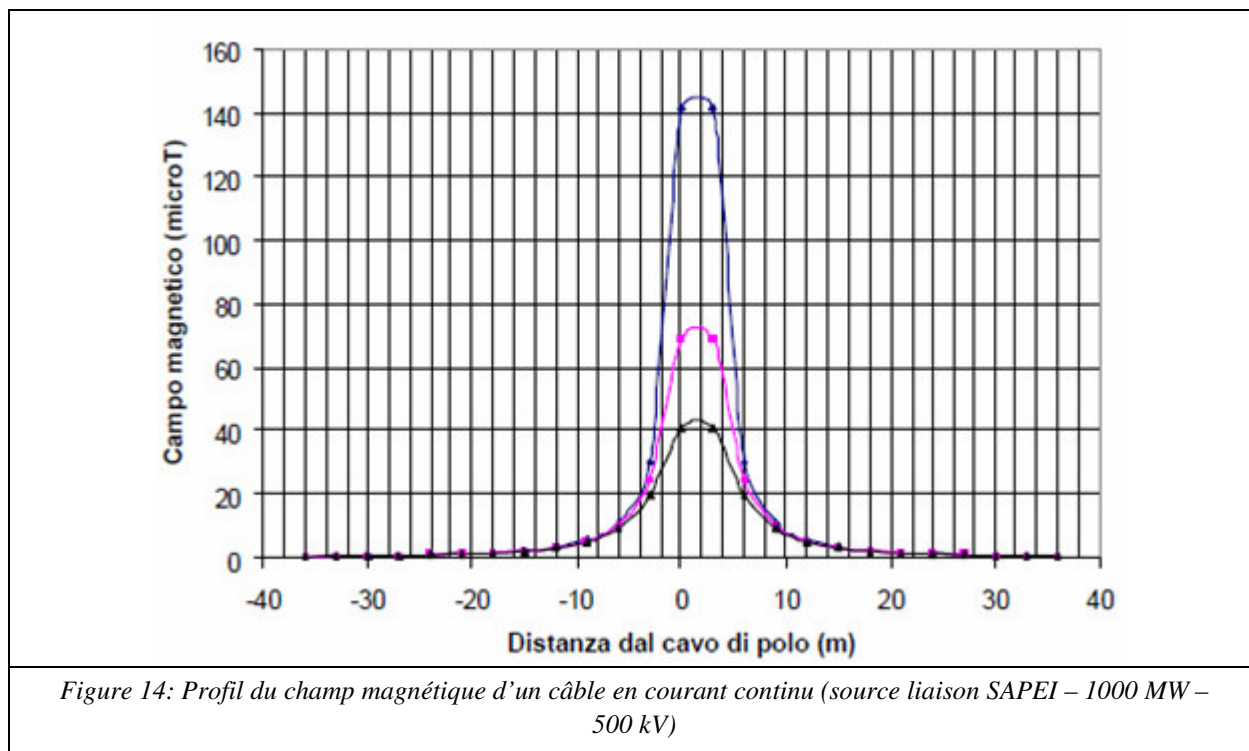
Milieu naturel

L'impact sur la flore et la végétation des lignes électriques enterrées en courant continu est semblable à celui qui a été décrit pour les câbles à courant alternatif, avec toutefois une largeur de couloir moins importante.

Champs électromagnétiques

Le profil du champ magnétique le long d'un câble enterré en courant continu est montré à la Figure 14 : les trois courbes se réfèrent à trois hauteurs différentes par rapport au câble enterré : niveau du sol (courbe bleue supérieure), 1 mètre par rapport au sol (courbe rose au milieu) et à deux mètres du sol (courbe noire inférieure). Il est important de noter les aspects suivants :

- Le champ magnétique généré par la liaison en courant continu est un champ statique ayant une valeur comparable à celle du champ magnétique naturel de la terre (compris entre 20 et 80 μT).
- Les effets sur la santé des champs magnétiques statiques d'intensité comparable à celle du champ naturel sont jugés inexistantes par l'Organisation Mondiale de la Santé.
- La Commission internationale de Protection contre le Rayonnement non ionisant (voir : www.icnirp.org) s'est intéressée à l'exposition aux champs magnétiques statiques. Concernant l'exposition professionnelle, les limites actuelles sont basées sur la nécessité d'éviter les sensations de vertiges et de nausées provoquées par le déplacement dans un champ magnétique statique. Les limites recommandées sont une moyenne pondérée en fonction du temps de 200 mT (2500 fois le champ naturel) pour l'exposition professionnelle au cours d'une journée de travail, avec une valeur maximale de 2 T (25000 fois le champ naturel). Une limite de 40 mT (500 fois le champ naturel) est fixée pour l'exposition continue du grand public.



3.1.5 Les impacts de la technologie sous marine en courant continu

Utilisation du terrain

En ce qui concerne les limitations à l'utilisation du terrain, le long du tronçon souterrain qui porte des postes amont et aval vers la mer les contraintes sont les mêmes que celles qui ont été prises en compte précédemment.

Milieu naturel

Les types d'impacts sur le milieu naturel le long du tronçon souterrain sont en principe les mêmes que ceux qui avaient été cités pour les câbles enterrés en courant continu.

Néanmoins, les caractéristiques spécifiques locales nous portent à prendre en compte les aspects suivants :

- Du côté français, entre Baixas et la côte, il existe plusieurs fleuves ou canaux non navigables, orientés Ouest-Est, perpendiculaires à la côte orientée Nord-Sud à cet endroit. Ceci pourrait correspondre à la direction recherchée pour atteindre la mer au plus court. Il conviendrait alors d'examiner le tracé, en tenant compte de l'important obstacle constitué par l'aéroport international de Perpignan-Rivesaltes.
- Du côté espagnol, par contre, il existe une bande d'espaces naturels protégés, formant un arc continu depuis la Jonquera jusqu'au sud de Gérone-ville qui, s'interpose entre le poste de Sta Llogaia et la côte. Cette bande qui comprend les espaces déclarés SIC et ZICO de L'Albera, le Cap de Creus et les Aiguamolls de l'Alt Empordá, conditionne fortement tout tracé dans la zone terrestre. La nécessité d'éviter ces aires protégées implique que les distances à couvrir par le tronçon terrestre, avant de se connecter au tronçon sous-marin, puissent être égales ou supérieures à celle qui existe entre Santa Llogaia et la frontière par la Jonquera. Le second aspect à considérer est que, entre Santa Llogaia et la côte, sauf dans la partie basse de la dépression de l'Ampurdán, qui couvre l'espace des Aiguamolls, il faudrait traverser des zones montagneuses dont le niveau est égal ou supérieur à celui du passage par la Jonquera. Dans tous les cas, les montagnes à traverser ont une géomorphologie beaucoup plus complexe, étant donné que sa structure est très chaotique, avec plusieurs chaînes de montagnes disposées obliquement les unes par rapport aux autres ; ceci détermine une zone avec une topographie et un bassin de drainage associé très complexe, avec des précipices profonds séparés par des élévations de niveaux notables allant souvent jusqu'au-delà de six cent mètres. Par ailleurs, le front littoral présente des formations de grand intérêt naturel déterminées par les prairies de Posidonia (*posidonia oceanica*), formations déclarées habitats prioritaires, et par conséquent infranchissables quand elles se situent dans des espaces classés Réseau Natura 2000. C'est le cas pour le Cap de Creus et la précitée région des Aiguamolls de l'Alt Empordá : ces zones sont à considérer non viables comme points de transition entre les tronçons souterrain et sous marin.
- **Zones de forte urbanisation de la zone côtière:** la zone côtière, du côté français, mais encore plus du côté espagnol est à vocation touristique et fortement urbanisée en dehors des espaces protégés. La côte est en effet occupée sur une bande quasi continue par des localités balnéaires, des campings, des infrastructures récréatives, folkloriques ou culturelles, qui rendraient très difficile la localisation de points de mise à la mer d'un câble sous marin.
- **Effets de la présence de câbles sous marins** sur l'environnement marin :
 - Impact des champs magnétiques :
 - impact possible sur l'environnement: invertébrés, poissons, poissons cartilagineux, mammifères

- influence possible sur les boussoles des bateaux: la littérature rapporte un accident survenu à un pétrolier dans la mer Baltique, dont l'analyse a mis en cause la présence d'un câble sous marin en courant continu. Le champ magnétique produit par le câble aurait eu une influence sur le système de guidage du bateau, basé en ce cas exclusivement sur les compas magnétiques;
- génération de courants induits sur les structures métalliques (plateformes pétrolières, oléoducs, armatures des câbles de télécommunication): corrosion potentielle.
- Impact des champs électriques :
 - Même s'il n'est pas possible d'exclure des effets négatifs des champs électriques sur l'environnement marin, on ne dispose d'aucune étude spécifique. La littérature traite des élasmobranches (poissons à squelette cartilagineux) qui sont sensibles aux champs électriques : ces espèces sont sans doute capables de percevoir à grande distance un champ électrique dont ils semblent exploiter les variations pour débusquer les proies cachées dans les sédiments du fond marin ; il faut donc supposer qu'ils s'adapteraient au champ électrique statique artificiel.
 - aucune espèce d'oiseau de mer ou mammifère n'est influencée par des champs électriques inférieurs à 1 V/m : ce qui porte à exclure cet impact ;
- Impact de la génération de chaleur
 - La production et de la dissipation de chaleur de la part du câble et des électrodes ne pose aucun problème pour la vie marine, car elle comporte des effets inférieurs aux variations normales de la température de l'eau.
 - Impact possible sur la qualité de l'eau, la flore (algues), les invertébrés, effet direct sur les poissons (diminution des aliments).
 - Impact de la présence de produits d'électrolyse générés par les électrodes (anode) : l'anode produit une série de composés primaires et secondaires potentiellement toxiques, dont les effets varient sensiblement en fonction de l'espèce marine considérée.

L'importance des impacts liés à la présence de l'anode ont porté les ingénieurs à remplacer les électrodes par une liaison physique en câble de moyenne tension qui assure le retour du courant. Cette solution sans électrode est actuellement la plus utilisée dans la réalisation des lignes sous marines en courant continu.

- Impact de la pose

La pose d'un câble sous marin implique une action sur les fond marins qui peut comporter des impacts sur les formations d'intérêt qui s'y trouvent. Cette circonstance est particulièrement importante pour les posidonies (habitat prioritaire déclaré par la Directive 92/43) dont la côte française et espagnole sont très riches.

4 POSSIBILITE DE SYNERGIE AVEC LA LIGNE TGV: TRAVERSEE DES PYRENEES EN TUNNEL

L'utilisation du tunnel ferroviaire de la ligne TGV pour faire transiter la ligne à très haute tension ne semble pas une possibilité techniquement viable, à moins que le tunnel n'ait été dimensionné en tenant compte de cette nécessité dès le départ. De nombreuses études ont été conduites dans le temps et, à titre d'exemple, nous citons l'étude italienne effectuée en 2005 sur les synergies entre le système électrique et le système ferroviaire [1]. La Figure 15 montre la possible localisation d'une ligne à très haute tension en isolation solide ou gazeuse dans un hypothétique tunnel de la ligne TGV. Les câbles seraient installés dans des tuyaux métalliques ou en polyéthylène à haute densité qui garantirait une protection mécanique adéquate. Les jonctions seraient réalisées à l'embouchure des connexions transversales d'inspection. L'analyse a permis d'estimer la possibilité d'insertion directe d'une seule ligne en câble. Ceci est largement moins important de ce qui serait nécessaire dans le cas d'étude. Une opportunité de traversée en tunnel pourrait être liée à l'utilisation d'un tunnel de service, parallèle à la voie de circulation, mais malheureusement dans le cas de la ligne TGV à travers les Pyrénées Orientales ce tunnel n'existe pas. Dans ce dernier cas, les câbles pourraient être installés sur des supports le long des parois ou enfouis, mais se pose alors la compatibilité des opérations de maintenance du câble avec la circulation ferroviaire.

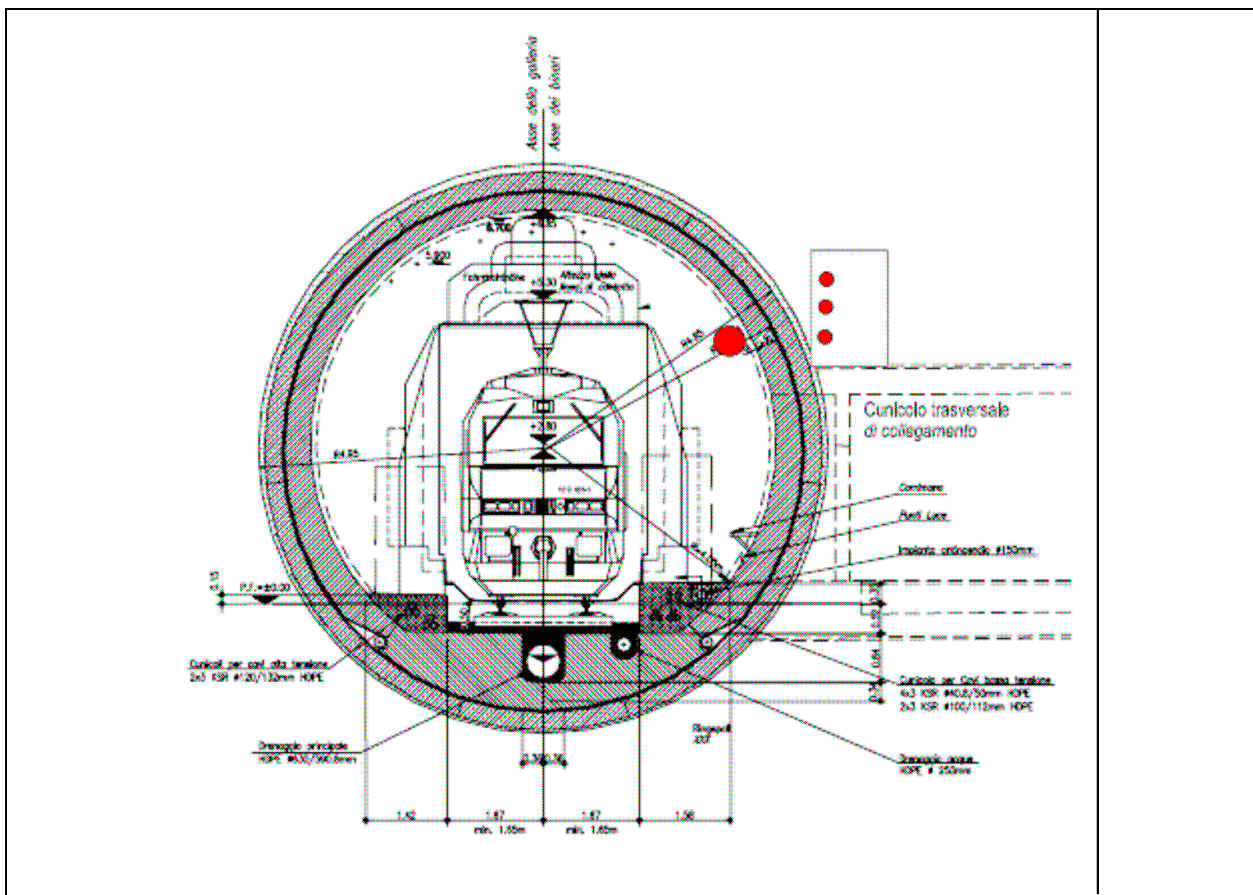


Figure 15: positionnement indicatif d'une ligne en câble (simple tricâble) dans un tunnel de ligne TGV

Mis à part la disponibilité d'espace, de nombreux autres aspects doivent être pris en compte lors de la recherche de synergies entre une ligne électrique et une infrastructure ferroviaire. Parmi les contraintes principales il faut mentionner les interférences électromagnétiques entre les circuits électriques et les

autres circuits (signalisation, télécommunications, etc.) et les effets des éventuels défauts et claquages qui, surtout en courant alternatif, pourraient avoir des conséquences graves.

En ce qui concerne ce dernier aspect, il faut remarquer que les effets sont très différents en fonction du type d'alimentation: lors du claquage, l'énergie qui se développe localement et qui endommage potentiellement le câble et son entourage a deux composantes principales:

- L'énergie emmagasinée dans le câble, qui se chiffre par la formule suivante:

$$W = \frac{1}{2} CV^2$$

Cette énergie est essentiellement dissipée dans les composants métalliques du câble. Une portion très limitée est dissipée au point de claquage.

- L'énergie injectée par la source d'alimentation (poste de transformation en courant alternatif ou postes de conversion en courant continu): cette composante est nettement plus importante que l'énergie emmagasinée dans le câble. Dans le cas de l'alimentation en courant continu, le courant de court-circuit est limité à 2 p.u. pour une période de 30 à 40 ms. Dans le cas d'un claquage à résistance de 0.1 Ω on peut imaginer une énergie dissipée sur le défaut de moins de 20 kJ. Le résultat d'un essai de court-circuit conduit en laboratoire sur un câble pour application en courant continu avec isolation papier et en imprimant une énergie de 60 kJ est montré dans la Figure 16. On voit un endommagement très localisé qui peut être aisément confiné avec des écrans métalliques ou polymères.



Figure 16: Endommagement de câble lors de l'essai de court circuit en configuration en courant continu

- La situation est très différente en courant alternatif. Dans ce cas l'énergie de la source ne peut être limitée que par l'intervention des dispositifs de protection et par l'ouverture des disjoncteurs de poste. Les effets du court-circuit sont nettement plus importants que ceux qui sont observés en courant continu. La présence rapprochée des câbles des différentes phases peut conduire à des dommages affectant plusieurs câbles. Les effets d'un court-circuit réalisé en laboratoire sur une configuration triphasée en courant alternatif avec un courant de défaut de 65 kA sont montrés dans la Figure 17. Il faut remarquer que l'énergie de claquage a provoqué sur le câble adjacent des dommages très significatifs. Pour éviter la propagation des défauts on peut utiliser des écrans, comme le montre la Figure 18.



Figure 17: Endommagement de câble lors de l'essai de court circuit en configuration en courant alternatif

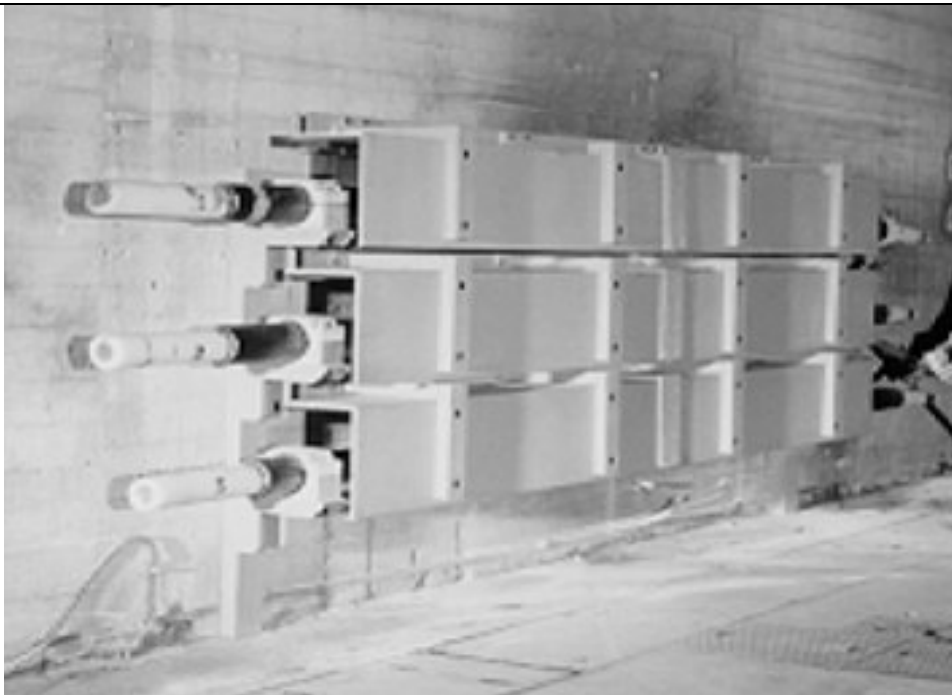


Figure 18: Ecran de protection contre la propagation des défauts en cas de court circuit d'une liaison en câble en courant alternatif

5 ETUDES NECESSAIRES POUR LA SOLUTION EN COURANT CONTINU

Dans le chapitre 2 on a vu les avantages présentés par l'adoption d'une solution en courant continu (CC) pour le tronçon transfrontalier de l'interconnexion ; par. ex. : contrôle complet du flux de puissance sur la liaison qui, par conséquent, peut être dimensionnée exactement pour la puissance voulue ; possibilité d'enfourer même des tronçons de longueur importante sans la nécessité d'installer des postes de compensation le long du parcours ; du point de vue des CEM, seul un champ magnétique statique est généré ; intégration plus aisée avec d'autres infrastructures (par ex. : voie ferrée). En revanche, la solution en courant continu présente quelques inconvénients tels que la nécessité de prévoir deux postes de conversion aux extrémités de la liaison, qui sont très coûteux et ont une emprise foncière très importante. De plus, l'interaction d'une liaison en courant continu avec le reste du système en courant alternatif présente des caractéristiques particulières : absorption de puissance réactive par les postes de conversion, génération d'harmoniques de courant, contribution nulle au lien synchronisant des deux systèmes, risque de résonance hyposynchrones, pouvant conduire à endommager des alternateurs électriquement proches.

Si l'option en CC était retenue, une série d'études dédiées devrait être conduite, dans le but de définir :

- a) le schéma de la liaison en CC (ex. : bipolaire, double bipolaire, câble de moyenne tension pour le retour de tension en émergence) ;
- b) le niveau de tension en CC (pour l'interconnexion en objet les valeurs typiques sont: 400 kV CC, 500 kV CC) ;
- c) la compensation de puissance réactive aux extrémités de la liaison en CC ;
- d) le dimensionnement des filtres pour la mitigation des harmoniques générées par les convertisseurs ;
- e) l'évaluation du risque de résonance hyposynchrones ;
- f) les prestations du système de contrôle aux convertisseurs ;
- g) des mesures particulières de protection contre l'interaction avec d'autres ouvrages.

a) et b) Le schéma de la liaison en CC et le niveau de tension sont normalement définis de façon à :

- garantir un niveau de fiabilité en dessus d'un seuil préfixé. Cette évaluation peut être conduite de manière synthétique en se référant aux taux de défaillance et temps de réparation typiques des différents éléments qui composent la liaison ;
- optimiser les coûts d'investissement et les coûts fixes (ex. : maintenance) et variables (pertes) d'exploitation.

c) Pour la définition de la compensation de puissance réactive dans les postes de conversion, on peut procéder en deux étapes :

1. évaluation préalable d'un niveau "standard" de compensation de puissance réactive et calcul de l'ESCR (extended short circuit ratio) défini comme suit :

$$ESCR = \frac{S_{CC} - Q_c}{P_{n_{DC}}}$$

où

- ✓ S_{CC} : niveau de court-circuit en MVA dans le nœud en CA du poste de conversion ;
- ✓ Q_c : puissance réactive en Mvar des filtres en CA ;
- ✓ $P_{n_{DC}}$: puissance nominale en MW de la liaison en HVDC.

Un faible niveau d'ESCR indique une interaction particulièrement évidente entre le poste de conversion et le réseau en courant alternatif et normalement révèle la nécessité d'adopter des équipements spéciaux pour la compensation réactive, tels que les Compensateurs Statiques de

Réactif (VSC) : dans ce cas un projet « non-standardisé » du poste de conversion pourrait s'avérer nécessaire. Au contraire, dans le cas d'une valeur élevée de ESCR, les oscillations de la tension dues au réseau en CA ou la variation du flux de puissance dans la ligne CC sont modérées et n'exigent pas de mesures spécifiques pour le contrôle de la tension et/ou pour la stabilisation du système.

En particulier:

- ESCR > 3 indique un système fort
- ESCR < 2 indique un système faible

Le paramètre ESCR est évalué habituellement en condition de charge de creux de consommation, quand la quantité des générateurs en service est minimale et par conséquent le niveau de puissance de court-circuit est le plus bas.

2. vérification que les dispositifs de compensation de puissance définis dans l'étape précédente sont adéquats. A ce but on exécute des analyses statiques pour vérifier que les tensions aux nœuds de réseau se trouvent dans la plage acceptable ; des vérifications additionnelles en conditions dynamiques sont indispensables surtout dans le cas de faible ESCR.

d) Pour la définition de la taille et du type des filtres nécessaires à réduire les harmoniques générées par les convertisseurs il faut considérer la réponse en fréquence du réseau en CA aux extrémités des terminaux CC/CA. Cette réponse change en fonction de la structure (topologie) du réseau, la composition de la charge et les caractéristiques des générateurs en service. Pour garantir donc qu'aucune résonance ne se vérifie et que le système puisse respecter les contraintes de qualité de la fourniture en toutes les conditions opérationnelles crédibles, on peut adopter l'approche de «sector impedance» qui a été déjà utilisée avec succès pour l'interconnexion en CC entre Italie et Grèce (500 MW) et qui est actuellement employée pour la nouvelle liaison en CC entre la Sardaigne et l'Italie (1000 MW).

e) En ce qui concerne le risque de résonances hyposynchrones, dans une phase préliminaire de faisabilité une étude générale devrait être conduite avec le but de déterminer s'il y a la possibilité d'une interaction considérable entre la liaison en CC et les vibrations torsionnelles de quelques unités turbo-générateur situées au voisinage des postes de conversion. Les vibrations torsionnelles, qui peuvent être stimulées par des perturbations dans le système en CA, pourraient être amplifiées par la possible interaction entre le rotor du turbo-générateur et le système de contrôle du poste de conversion. Typiquement seulement les turbo-générateurs qui sont faiblement connectés au réseau en CA et qui sont situés près d'un convertisseur agissant comme redresseur pourraient être affectés par les résonances hyposynchrones.

Les spécifications des systèmes en CC, dans lesquels l'étude générale a montré un risque potentiel de résonance torsionnelles, doivent incorporer les mesures aptes à garantir l'amortissement des oscillations entre turbo-générateurs et redresseur en incluant des boucles de contrôle appropriées.

L'étude générale pourrait être basée sur le standard de spécification technique IEC 60919-3 "*Performance of high-voltage direct current (HVDC) systems – Part 3: Dynamic conditions*".

f) Dans les liaisons en CC les boucles de contrôle jouent en rôle essentiel pour garantir une performance optimale en conditions dynamiques. Au-delà du contrôle du flux de puissance les convertisseurs peuvent aider à régler la fréquence d'un des deux côtés et, aussi, à mitiger l'ampleur des oscillations inter-zonales. Ce dernier aspect est particulièrement important pour l'interconnexion entre la France et l'Espagne. Pour la synthèse des boucles de contrôle il est nécessaire d'avoir recours à des modèles dynamiques sophistiqués qui considèrent non seulement les aspects electro-mécaniques, mais aussi la dynamique électromagnétique.

g) Dans le cas où la liaison en CC est située au voisinage d'autres infrastructures, il est nécessaire d'analyser à l'avance les possibles interactions et, le cas échéant, prendre des mesures particulières de protection. Dans le cas de l'interconnexion entre la France et l'Espagne la ligne en CC pourrait être construite partiellement le long du tracé de la ligne TGV. Il faudrait donc examiner que l'ondulation (« ripple ») du courant continu, qui n'est jamais parfaitement régulier, n'induit pas des interférences avec le système de signalisation des trains. En outre, l'alimentation en CA des trains à grande vitesse pourrait à son tour induire des harmoniques de courant dans la ligne CC et, donc, il faudrait bien dimensionner la réactance de lissage.

Les considérations illustrées ci-dessus donnent un aperçu très général de la complexité des études à conduire pour un projet d'interconnexion en CC qui n'est presque jamais un projet standard, mais chaque fois il faut conduire des analyses dédiées pour la phase de faisabilité, spécifications fonctionnelles, pré-projet, qualification et essais de la fourniture.