

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

Sujet Comparaison des solutions en courant continu enfouies terrestres ou mixtes (terrestre et sous-marine). Cahier n° 6

Commande

Notes version originale en langue française

PUBBLICATO A8016549 (PAD - 1063430)

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

N. de pages 29

N. de pages annexées: 0

Date d'émission: juin 2008

Prepared IMP - Cova Bruno
A8016549 2982 ALT
Michele de Nigris (CESI RICERCA)

Verified SIS - Ardito Antonio
A8016549 2935 VER

Approved SIS - Il Responsabile - Ardito Antonio
A8016549 2935 APP

Mod. RAPP v. 01

Table des matières

1	AVANT-PROPOS	3
2	SOLUTION EN COURANT CONTINU POUR LE TRONÇON TRANSFRONTALIER	4
2.1	Rappels sur la technologie en courant continu	4
2.2	Éléments de comparaison	6
2.3	Solution terrestre enfouie	10
2.4	Solution « mixte » terrestre et sous-marine	10
3	ALTERNATIVES POSSIBLES POUR LA REALISATION DU TRONÇON TRANSFRONTALIER.....	12
3.1	Zone d'étude pour l'alternative d'enfouissement terrestre.....	12
3.2	Alternative d'enfouissement terrestre : analyse environnementale.....	14
3.3	Zone d'étude pour l'alternative mixte terrestre sous-marine.....	16
3.3.1	Partie terrestre côté français	16
3.3.2	Partie sous-marine	18
3.3.3	Partie terrestre côté espagnol.....	19
3.4	Alternative mixte souterraine sous-marine : analyse environnementale	21
3.5	Comparaison des alternatives	24
3.5.1	Longueurs des couloirs.....	28
3.5.2	– Synergies possibles avec d'autres infrastructures	28
3.5.3	Incertitudes et aléas	29

1 AVANT-PROPOS

Suite aux analyses effectuées dans la deuxième étape qui a concerné la présentation générale du schéma directeur des Pyrénées, l'identification de la meilleure localisation du nouvel axe entre la France et l'Espagne et la comparaison des solutions technologiques possibles pour le nouvel axe, il est apparu que pour le tronçon transfrontalier, de Baixas à Sta. Llogaia, la meilleure solution consisterait dans une liaison en courant continu enfouie. En effet, cette solution présente plusieurs avantages tels que :

- possibilité de contrôle total du flux de puissance ;
- impact visuel faible et emprise sur le terrain très réduite par rapport aux lignes aériennes et aussi au câbles en courant alternatif ;
- meilleure possibilité de mutualiser la liaison en courant continu avec d'autres infrastructures telles que les infrastructures routière, autoroutière ou ferroviaires, du fait que le champ magnétique généré est statique, avec une valeur comparable à celle du champ magnétique terrestre.

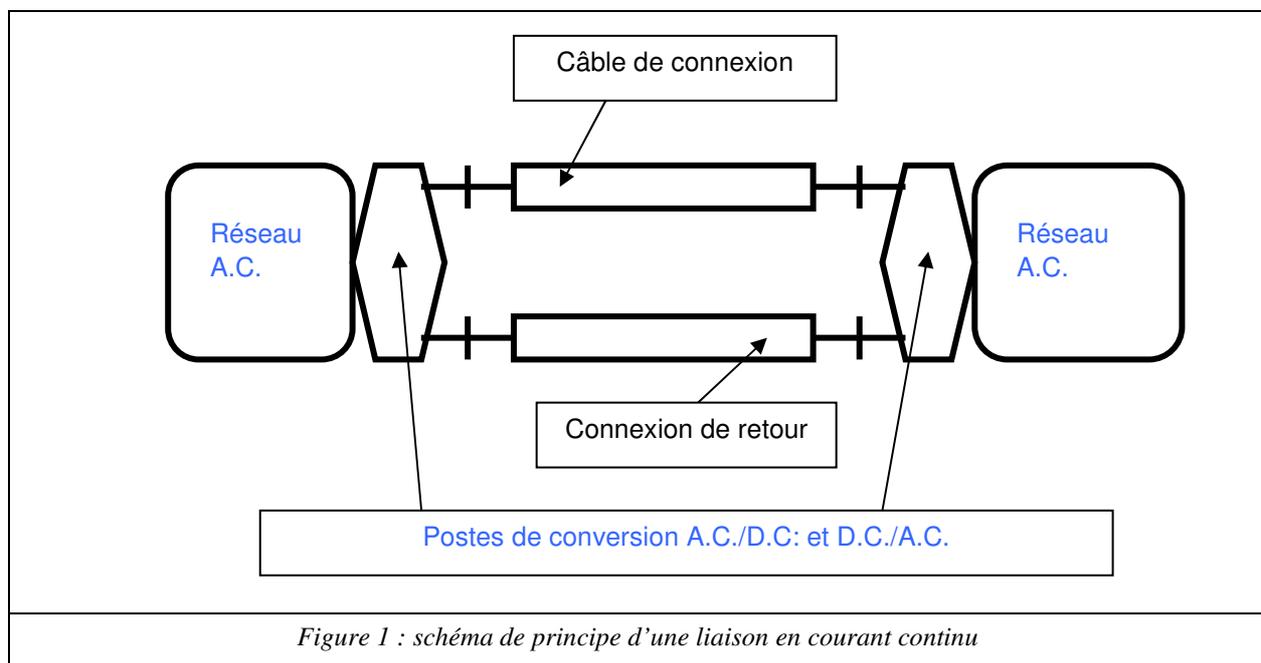
La solution d'enfouir – en courant continu – le tronçon transfrontalier, a trouvé un certain écho auprès des associations locales et les autorités des deux pays ont manifesté leur soutien – de façon explicite – à ce choix. Restait à déterminer s'il s'agissait d'un enfouissement « terrestre » ou bien « marin ». Il convient d'ailleurs de définir cette solution comme « mixte terrestre et sous-marine » compte tenu de l'importance de la longueur des tronçons terrestres en France et en Espagne pour rejoindre la côte.

Pour la réalisation du tronçon transfrontalier, il a ainsi été demandé d'examiner l'alternative de solution terrestre enfouie et de solution « mixte » terrestre et sous-marine. La première partie de ce cahier illustrera donc, de façon générale, les avantages et les contraintes à respecter pour chaque alternative. Ensuite, une synthèse de la mise en contexte des différentes alternatives sur la base des informations fournies par les Gestionnaires de Réseau Français (RTE) et Espagnol (REE) sera présentée.

2 SOLUTION EN COURANT CONTINU POUR LE TRONÇON TRANSFRONTALIER

2.1 Rappels sur la technologie en courant continu

Le schéma général d'une liaison en courant continu est représenté dans la Figure 1: deux réseaux en courant alternatif (dans le cas en objet le réseau français et le réseau espagnol) sont reliés au travers d'une série d'éléments qui transforment le courant alternatif en courant continu (redresseur), transportent l'énergie le long d'une série de câbles et re-transforment le courant continu en courant alternatif (onduleur). Le système est complètement réversible et le flux de puissance peut circuler dans les deux sens, selon le réglage imposé par l'opérateur.



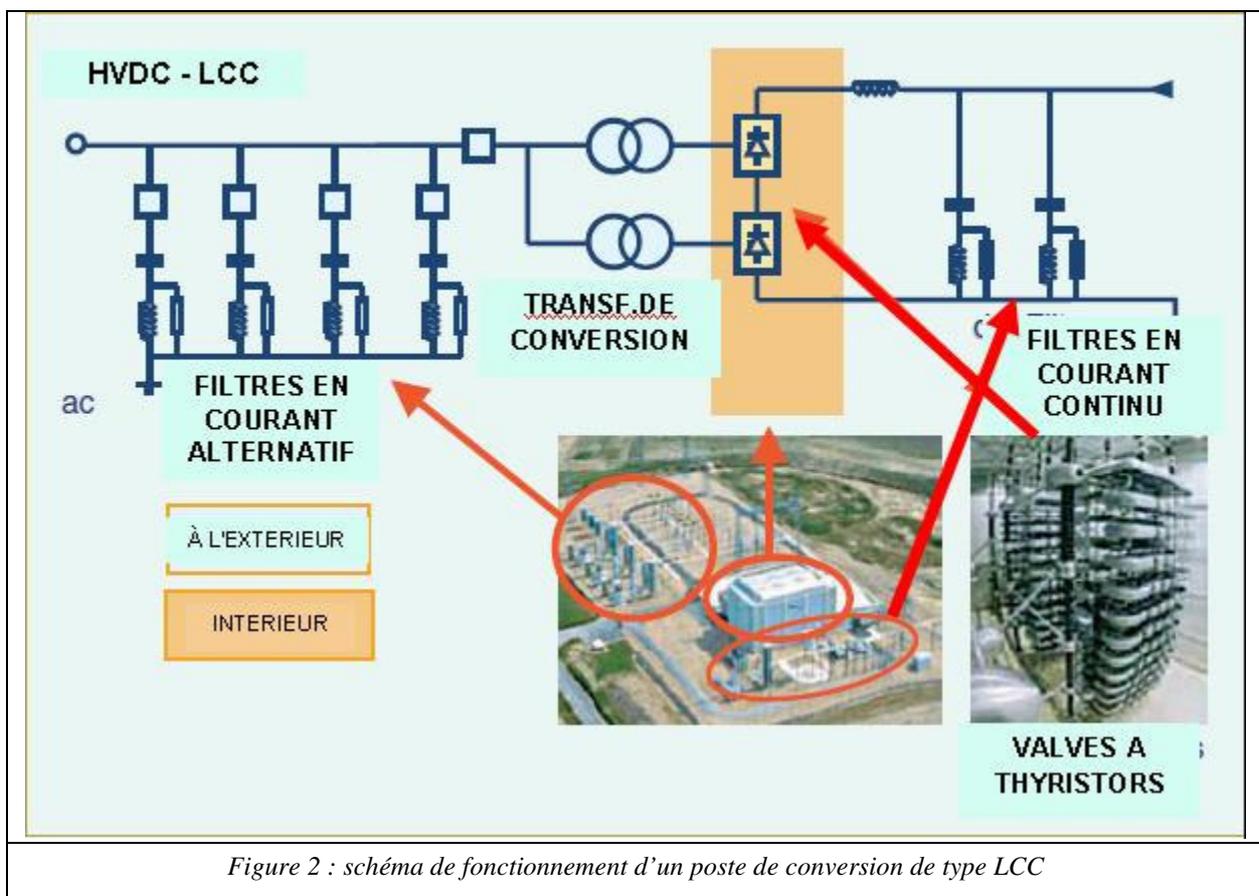
Sans rentrer dans les détails techniques de la liaison, qui doivent être objet d'études spécifiques de faisabilité et de dimensionnement, il faut qu'on mentionne les deux principales technologies qui sont utilisées dans le monde pour la réalisation de ce type de liaison, et qui se différencient tant pour la configuration des postes de conversion que pour le type et nombre de câbles qui peuvent être utilisés.

Les deux familles de configurations sont les suivantes :

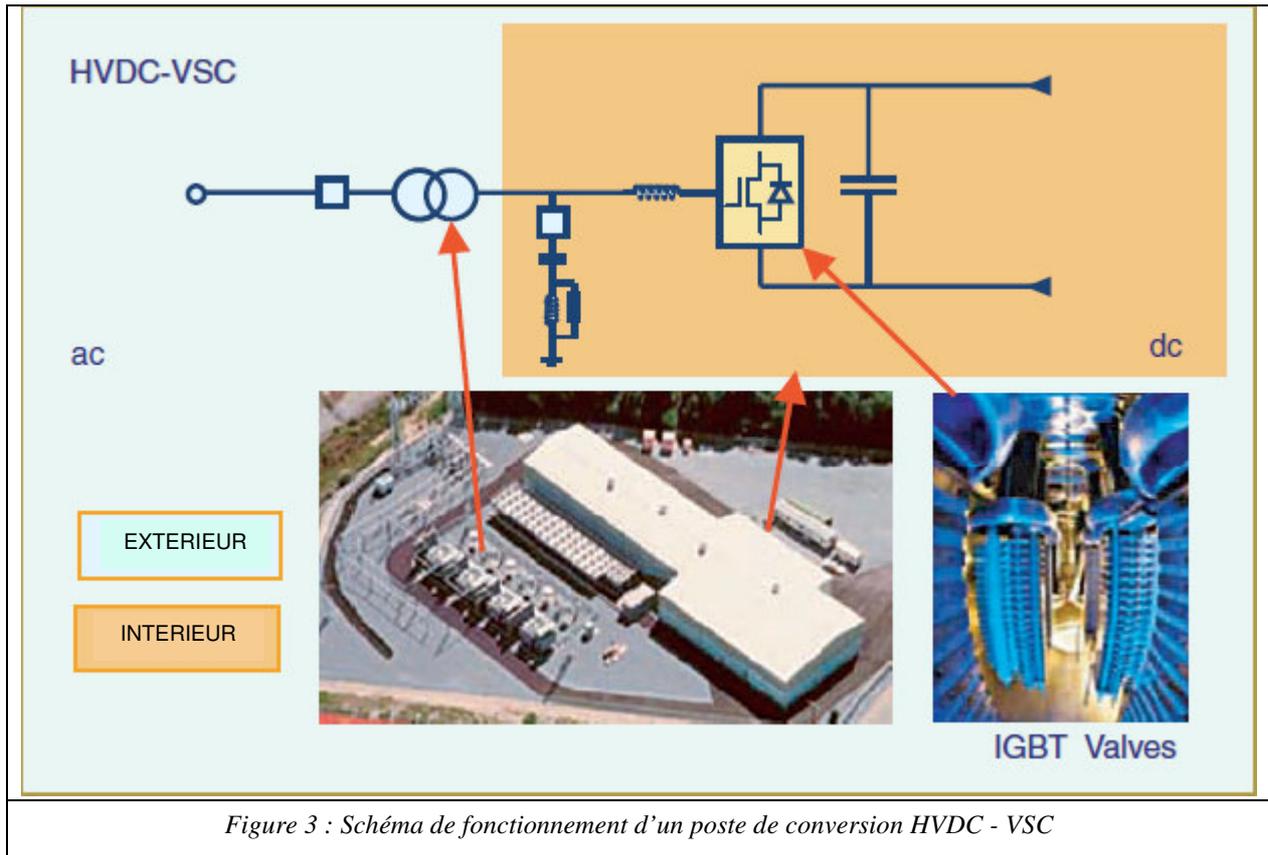
- **LCC (Line Commutated Converters)** : convertisseurs à commutation de ligne, dont les éléments de base sont des thyristors : ils ont été développés dès les années 50 (à l'époque les thyristors étaient à vapeurs de mercure, tandis qu'actuellement ce sont des composants d'électronique de puissance basés sur le silicium) et se basent sur une technologie très affirmée et stable. Ils sont adaptés pour le transport de grandes quantités d'énergie aux niveaux de tension les plus élevés (la technologie pour le niveau +/- 600 kV est tout à fait stabilisée, alors qu'on qualifie actuellement pour le marché chinois les composants de ligne et de poste pour le +/-800 kV) ; ce système nécessite d'importants réseaux en amont et en aval et permet le flux de puissance dans les deux sens. Des filtres et des bancs de condensateurs sont nécessaires pour la compensation de l'absorption de puissance réactive et pour mitiger les harmoniques de courant générées par les convertisseurs ;

- VSC (Voltage Source Converter) :** convertisseur à source de tension, dont les éléments de base sont les IGBT (Transistors Bipolaire à Porte Isolée) dont la réalisation est plus récente et basée sur les retombées de l'électronique de puissance moderne. Cette technologie, développée à la fin des années '90 est en train de se diffuser dans le monde entier grâce à ses coûts compétitifs et à sa plus grande simplicité. La technologie ne nécessite pas de réseau fort en amont et en aval (aucune nécessité de compenser le réactif par des moyens extérieurs) et est très intéressante pour acheminer à terre l'énergie produite par les éoliennes en haute mer. Les applications actuellement en cours sont relatives à des puissances d'au maximum 350MW.

Le schéma de fonctionnement d'un poste de conversion de type LCC est montré dans la Figure 2 : on y remarque la présence des filtres aux deux bornes, les transformateurs de conversion et les modules de valves à thyristors. La figure représente un poste mono-polaire avec électrode de retour.



Le schéma de fonctionnement d'un poste de conversion de type VSC est montré dans la Figure 3. On y remarque les transformateurs de conversion, le filtre intermédiaire et le module de valves à transistors IGBT. La figure représente un poste bipolaire.



2.2 Eléments de comparaison

Le niveau de développement technologique des deux options n'est pas le même : les applications commerciales de la technologie LCC étant nettement plus performantes que celles de la technologie VSC. Le Tableau 1 résume les caractéristiques et les limites actuelles de chacune des options.

Tableau 1 : éléments de comparaison entre les différents schémas de conversion HVDC

	LCC	VSC
Tension maximale en application commerciale	+/- 600 kV	+/- 150 kV
Puissance maximale (par circuit) en application commerciale	3150 MW	350 MW
Tension maximale en développement	+/- 800 kV	+/- 300 kV
Puissance maximale (par circuit) en développement	6400 MW	1100 MW

La taille maximale des liaisons en CC à VSC mise en service jusqu'à présent est de 330 MW avec une tension de ± 150 kV. Actuellement, des tailles plus grandes sont proposées par les constructeurs (ABB et Siemens) avec une puissance nominale de 500 MW à ± 150 kV ou de 1000 MW à ± 300 kV. **Pour assurer une capacité de transport comme celle requise dans ce projet il faudrait donc prévoir deux liaisons en CC à VSC enterrées. Ce qui comporterait la nécessité d'enfouir quatre câbles au lieu que de deux ou trois (selon le schéma choisi) dans le cas de poste de conversion à thyristors .**

En revanche dans le cas de solution à thyristors (LCC) il est nécessaire de garantir une valeur de ESCR¹ supérieure à 2, pour assurer la stabilité de la tension face aux variations de la puissance absorbée ou injectée dans la liaison en courant continu.

- *Emprise des postes de conversion* : l'évolution technologique a permis de contenir, grâce à l'application de la technologie VSC l'emprise des postes de conversion. A titre d'exemple nous prenons en considération le poste de Cross Sound Cable, mis en service en 2002 et ayant une puissance de 362MW et une tension de +/-150kV. La Figure 4 montre une vue aérienne du poste sur laquelle on peut remarquer la section en courant alternatif à l'air libre et la section en courant continu en bâtiment. Le système de refroidissement des valves occupe une surface très significative. Du point de vue quantitatif, le poste a une emprise d'environ 10000 m², soit une emprise spécifique de 30 m²/MW et se trouve proche de la limite supérieure pour la technologie.



Figure 4 : vue aérienne du poste de conversion de Cross Sound Cable pour liaison en courant continu de type VSC

¹ L'index ESCR (extended short circuit ratio) est 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 ;

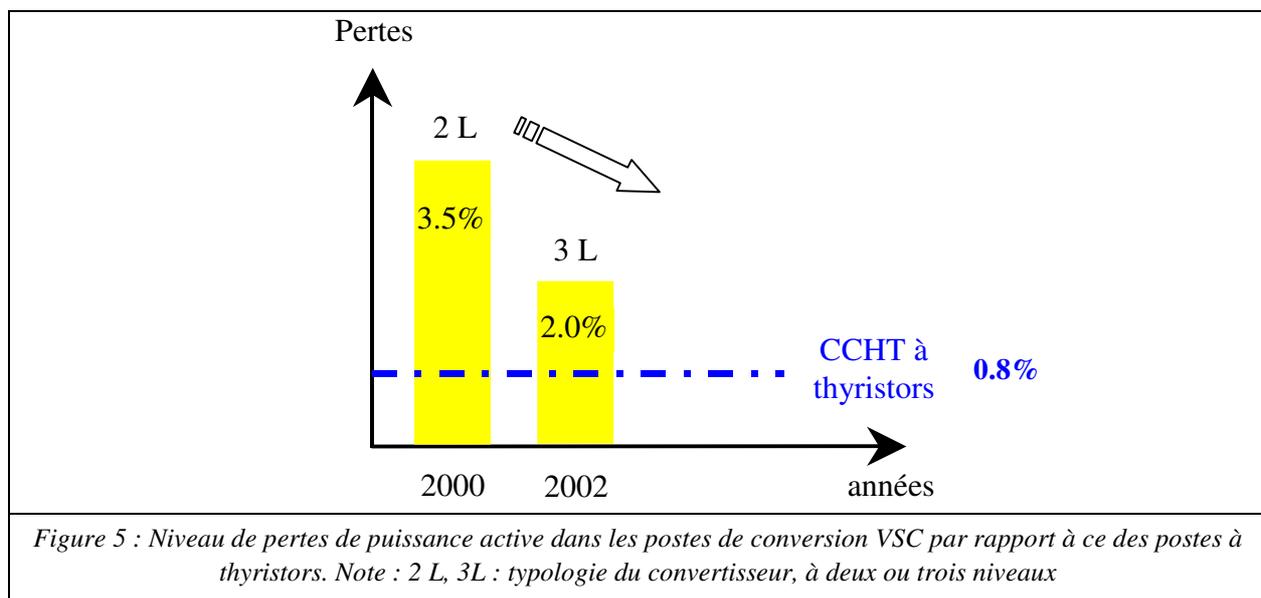
$P_{n_{DC}}$: puissance nominale en MW de la liaison en HVDC.

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 (SVC) : 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. Les valeurs minimales recommandées de l'indice ESCR sont de 2 à 3.

En général, si on exclut l'emprise du transformateur de conversion et des systèmes de refroidissement des valves, l'emprise des postes de conversion en technologie VSC peut se résumer comme suit

Tension	Taille	Emprise	Emprise spécifique	Notes
± 80 kV	100÷300 MW	40x18 m	2.4 à 7.2 m ² /MW	
± 150 kV	175÷500 MW	90x40 m	7.2 à 20 m ² /MW	Estlink
± 300 kV	500÷1000 MW	140x70 m	10 à 30 m ² /MW	L'encombrement spécifique est comparable à celui des postes LCC mais avec des filtres plus petits

- pertes* : les postes de conversion à VSC présentent des pertes de puissance active remarquablement plus élevées que dans le cas de conversion CA/CC à thyristors. Bien que l'adoption de convertisseurs VSC à plusieurs niveaux ait permis de réduire les pertes, elles sont quand même de l'ordre de 2%² par convertisseur à comparer avec une valeur de 0.8% dans le cas de convertisseurs conventionnel à thyristors. Aux pertes dans le convertisseur il faut ajouter celles du transformateur convertisseur, réactance de couplage entre le convertisseur et le réseau CA, filtres en CA, filtres en CC et auxiliaires, ce qui conduit à un niveau de pertes d'environ 4.0÷4.5% pour l'ensemble des composants du poste de conversion dans le cas de convertisseur à deux niveaux ; cette valeur se réduit à environ 3% dans les postes avec convertisseur à trois niveaux. Enfin, pour l'évaluation des pertes totales de la liaison il faut considérer les pertes des câbles enterrés qui sont proportionnelles à la longueur des câbles et au carré de l'intensité du courant.



- Distorsions harmoniques* : l'adoption de la technique PWM dans le pont de conversion permet de réduire l'impact harmonique tant du côté CA que CC et, par conséquent, il est possible d'installer des filtres de tailles, et donc de dimension, moindres par rapport à ceux qui sont utilisés dans le cas des convertisseurs à thyristors.
- Fiabilité et disponibilité* : une statistique sur les expériences opérationnelles des installations en CC à VSC de taille importante n'est pas encore disponible et on ne peut pas par conséquent s'exprimer sur le niveau de fiabilité et disponibilité. Cependant, en se référant aux études conduites par les

² Valeur exprimée en pourcentage de la puissance nominale.

constructeurs, pour les postes de conversion on estime des valeurs dans la plage 98÷99%, ce qui veut dire qu'on prévoit que pendant une année l'ouvrage peut fonctionner pour 98÷99% du temps à sa pleine puissance. En ce qui concerne les câbles enterrés, jusqu'à présent on a relevé des excellentes performances de fiabilité. En effet, la possibilité d'installer des jonctions préfabriqués, au-delà de la remarquable accélération des temps de réalisation, augmente la fiabilité de la liaison. En se référant à la liaison terrestre Murraylink (Australie), ayant une longueur de 180 km et une taille de 200 MW, on a constaté qu'après quatre ans d'exploitation aucun défaut ne s'est produit.

- *Possibilité d'adopter une solution multiterminale* : les solutions multiterminales à VSC, bien que possibles du point de vue théorique n'ont pas encore été adoptées jusqu'à présent. La faisabilité réelle de l'exploitation fiable et sûre de ces schémas de connexion doit faire l'objet d'études spécifiques s'agissant de solutions jamais adoptées jusqu'à présent.

En ce qui concerne les câbles (enterrés ou sous-marins), les technologies de construction sont les suivantes :

- **Câbles à isolation en huile fluide** (Self-Contained fluid filled cables – SCFF) : ce sont des câbles dont le système d'isolation est composé de papier qui est imprégné d'un fluide synthétique à basse viscosité (huile) qui est maintenu constamment en pression dans un conduit pratiqué dans le centre du conducteur : ceci induit une limitation du niveau de profondeur maximal de pose ; cette solution, utilisée depuis de nombreuses années est adéquate à de grands transits d'énergie à condition de veiller à ne pas dépasser une température sur le conducteur de 85°C, à cause de la présence de l'huile ; la présence d'un fluide en circulation impose l'adoption de circuits hydrauliques et des postes de pompage aux extrémités. Une fuite éventuelle d'huile constitue un danger potentiel pour l'environnement ;
- **Câbles à isolation solide imprégnée de mélange** (Mass Impregnated – MI) : ce sont des câbles dont le système d'isolation est constitué de papier à haute densité imprégné d'un mélange dense. Contrairement à ce qui se passe pour les câbles à isolation en huile fluide, le mélange d'imprégnation ne circule pas dans le conducteur et dans le corps du câble mais reste pratiquement stable dans sa position d'origine. On peut aujourd'hui réaliser des connexions longues de plusieurs centaines de kilomètres en utilisant cette technologie ; les limites techniques sont à 600kV de tension et 55°C de température. Ce type de câble a été récemment employé pour la réalisation de l'interconnexion sous-marine en courant continu entre l'Italie et la Grèce (liaison à 400kV 500MVA longueur 160km).
- **Câbles à isolation mixte papier-polypropylène** (Paper Polypropylene Layer – PPL) : ce sont des câbles dont le système d'isolation est constitué de papier à haute densité imprégné d'un mélange visqueux, mais dont les couches de papier sont séparées par des films de polypropylène ; cette solution de développement récent (essais de qualification complétés mais installations sur site non encore pratiquées) conjugue les avantages des deux technologies précédentes ; par rapport à la solution à isolation solide elle permet un gain de 25 à 50 % de puissance transportée ou une réduction de 30% des dimensions pour un même transit ; cet atout permet une réduction du diamètre de 10%, du poids en air de 20% et du poids en eau de 25% . L'utilisation de ce type de câble permet donc d'avoir des tronçons sensiblement plus longs et de porter en plate-forme de pose 25% de câble en plus par rapport à la technologie à isolation solide.
- **Câbles à isolation extrudée en matériaux polymères** (POL) : ce sont des câbles tout à fait semblables aux câbles pour application en courant alternatif, dont le système d'isolation est constitué d'une masse en polymère, une matière plastique complexe de formulation récente pour les applications en très haute tension ; les atouts de cette technologie sont constitués par le niveau de

température maximale (jusqu' 90°C) qui permet des portées en courant très élevées, l'absence d'huiles et d'imprégnant qui en fait une solution très propre et simple, la possibilité d'utiliser des accessoires (jonctions, extrémités) préfabriquées qui permettent un montage des plus aisés et rapides. Le type d'isolation qui est utilisée ne permettant pas d'inversion de polarité, cette solution n'est applicable que pour la configuration de conversion VSC et n'est pas utilisable pour les lignes LCC.

2.3 Solution terrestre enfouie

Si la configuration LCC est retenue, les câbles doivent être isolés en papier, soit à circulation d'huile (SCFF) soit à imprégnation de masse (MI), les câbles à isolation POL ne pouvant être utilisés dans les applications qui prévoient une inversion de polarité. Les câbles à isolation mixte papier-polypropylène (PPL) ne présentent pas de contre-indication pour cette application, même si leur utilisation est encore très limitée à cause de leur développement et qualification récents. Le choix du type d'isolation et donc de la température maximale de fonctionnement ont une implication primordiale sur la section du conducteur et donc sur les dimensions totales de chaque câble. Le Tableau 2 montre dans le cas de la solution terrestre enfouie, le nombre de câbles nécessaires et les sections de conducteur qui devraient être utilisées pour un transit de d'au moins 1400MW.

Tableau 2 : comparaison des technologies de câbles en courant continu envisageables pour la solution terrestre enfouie

Type d'isolation des câbles souterrains	MI	PPL	SCFF	POL (seulement VSC)
Nombre de câbles nécessaires	2	2	2	4
Section du conducteur [mm ² de cuivre]	2500	1750	1400	1400

La largeur totale des tranchées nécessaires pour la pose des câbles est donc conditionnée par le choix de la technologie de convertisseur (LCC ou VSC) et par le choix du type d'isolation des câbles. On peut d'ores et déjà imaginer la création de deux tranchées parallèles et distancées d'au moins 3 mètres et d'une éventuelle tranchée supplémentaire qui devrait loger le (ou les) câble(s) de retour (dont l'isolant est dimensionné pour une valeur nettement plus basse mais dont la section totale de conducteur est tout à fait comparable à celle des câbles de haute tension). Ce câble de retour permet le fonctionnement (à prestations dégradées) d'une liaison en courant continu bipolaire même dans le cas de claquage d'un câble à haute tension. La profondeur de pose est d'environ 1.2 à 1.5 mètres et comporte tous les 1000 mètres environ une chambre de jonction. Afin de permettre l'écoulement de la chaleur produite par les pertes des câbles et de protéger mécaniquement les câbles contre les contraintes mécaniques externes, les tranchées sont remplies de ciment maigre.

La réalisation de ces infrastructures à développement linéaire important s'accompagne normalement de la pose de câbles de télécommunication (en fibre optique) et de voies de contrôle-commande comme par exemple les moyens de surveillance du profil de température le long du parcours.

2.4 Solution « mixte » terrestre et sous-marine

La liaison mixte est constituée par deux longs tronçons terrestres enterrés et une section sous-marine de longueur importante. Pour sa réalisation il est nécessaire de prévoir deux types différents de câbles pour les deux parties (terrestre et sous-marine).

- Les câbles utilisables pour la partie terrestre sont tout à fait identiques à ceux qui ont été pris en compte pour la solution terrestre enfouie : les technologies MI, PPL, SCFF sont utilisables et comportent chacune les mêmes avantages et inconvénients qui ont été démontrés précédemment.
- La partie sous-marine ne peut être réalisée qu'avec une technologie MI ou PPL. Les longueurs de la partie sous-marine rendent en effet la technologie SCFF inutilisable à cause de la nécessité de compenser les pressions d'huile fluide d'isolation pour éviter la formation de bulles d'air. Cette compensation (qui se fait normalement au moyen de petits réservoirs d'huile surélevés par rapport au câble) n'est pas possible en sous-marin.

Les sections possibles des câbles sous-marins sont les suivantes:

Tableau 3 comparaison des technologies de câbles en courant continu envisageables pour la partie sous marine

Types d'isolation des câbles pour la partie sous-marine	MI	MI-PPL	SCFF	POL (seulement VSC)
Nombre de câbles nécessaires	2	2	n.a.(*)	4
Section du conducteur [mm ² cuivre]	2000	1400	-	1000

(*) Comme nous l'avons dit précédemment, la technologie des câbles SCFF n'est pas utilisable sur les longs parcours sous-marins et, donc, elle ne peut pas être prise en considération.

Le niveau de fiabilité des liaisons sous-marines peut être aussi élevé que celui des liaisons terrestres, à condition que soient prises des mesures de prévention adéquates comme par exemple :

- l'exploration marine pour la définition du meilleur parcours pour le passage des câbles, cette exploration se fait au moyen d'instruments à bord des navires lorsque la profondeur n'excède pas 400 m, tandis que des robots sous-marins sont nécessaires pour des profondeurs plus importantes et en présence de fonds irréguliers. Des études géotechniques sont aussi essentielles, accompagnées souvent par des opérations de prélèvement (carotage) de fond et de déblaiement pour ôter d'éventuels obstacles ;
- la mise au point des moyens de protection des câbles, surtout dans les zones à profondeur moindre ;
- les procédures de pose et de soulèvement des câbles lors des opérations de réparation.

Les techniques de production et de transport des câbles destinés à une pose sous-marine permettent de réaliser la partie sous-marine sans avoir à réaliser de jonction sur site. Ceci constitue un atout important car la fiabilité intrinsèque de la liaison est augmentée. La pose des câbles, en absence de jonctions, est exécutée d'un seul tenant pour chaque câble, en posant (à partir d'un navire spécialement aménagé) une tête du câble jusqu'à la jonction terre-mer (par ex. du côté français) et en s'éloignant de la côte le long du parcours de projet jusqu'à atteindre l'autre extrémité (par ex. la côte espagnole) à proximité de l'autre jonction terre-mer. Cette séquence doit être répétée trois fois dans le cas d'une liaison LCC : deux fois pour les câbles de pôle et une fois pour le câble de retour du courant en moyenne tension. Le tracé peut être garanti si le navire est équipé de systèmes de positionnement très précis. En outre, pendant la pose, le contrôle de la tension mécanique sur le câble a une importance fondamentale pour garantir une valeur correcte de cette tension du câble sur le fond : une mesure continue (avec enregistrement) sera donc nécessaire au moyen de dynamomètres et échosondeur pour la profondeur marine.

La protection mécanique des câbles est choisie en fonction des résultats de l'analyse marine. En général on distingue entre:

- la protection aux points d'abordage : Aux points d'abordage le câble est protégé en général par des « coquilles » en fonte ou par l'enfouissement à une profondeur d'environ 1 m, réalisée avec une

technique de terrassement dite « jetting ». D'autres techniques de protection consistent en la pose en tuyau ou la fixation sur le fond (en présence de posidonie), selon les conditions locales du fond.

- la protection le long du parcours : Le long du parcours la protection peut être réalisée au moyen de la technique de « jetting » si le fond est sablonneux, tandis qu'en cas de fond dur ou rocheux il faut utiliser d'autres techniques pour protéger les câbles (par exemple au moyen de matériels spéciaux de protection), car il n'est pas possible ou économiquement viable d'enfouir le câble. L'analyse sous marine mettra en évidence en outre les nécessités éventuelles d'exécuter des travaux additionnels pour le franchissement d'autres infrastructures sous-marines (ex. câbles de télécommunications) éventuellement présentes sur le tracé.

L'emprise de la tranchée pour les jonctions terre-mer est d'environ 10 m de longueur et 1 m de largeur.

En cas de défaut dans la partie sous-marine, il faut prévoir des temps de réparation sensiblement plus longs que pour la partie terrestre enfouie, à cause de la nécessité de localiser le point de défaut, conduire sur site un navire apte pour le soulèvement du câble et réaliser la jonction de réparation à bord du navire.

Dans le cas de la solution mixte, l'aspect relatif aux parties de rechange devient aussi plus onéreux, les caractéristiques des câbles terrestres et sous-marins étant en général différentes³ tout comme le type de jonctions.

En ce qui concerne les essais de qualification des câbles et des accessoires, au-delà des essais sur les câbles terrestres prévus dans les deux les solutions de parcours, des essais spécifiques supplémentaires devront être exécutés aussi pour les câbles sous-marins et leurs accessoires : ces essais sont essentiellement des essais mécaniques de traction et de pliage, suivis par des essais électriques selon les normes normalement utilisés.

3 ALTERNATIVES POSSIBLES POUR LA REALISATION DU TRONÇON TRANSFRONTALIER

3.1 Zone d'étude pour l'alternative d'enfouissement terrestre

La zone retenue est délimitée comme suit :

- Au Nord et Nord-Ouest par le couloir des lignes 400 kV existantes (Baixas-La Gaudière-Vic) jusqu'au Nord de St. Marsal
- A l'Ouest le long d'une courbe qui passe par un point en aval de Céret, passe la frontière à Puig des Salines, passe en Espagne près de Damius et descend à Vilafant pour rejoindre Sta Llogaia
- Au Sud par le poste de Sta Llogaia
- Au Sud-Est par une ligne qui longe, en l'excluant, l'agglomération de Figueres et remonte jusqu'à la frontière française à la hauteur de Puig Neulos
- A l'Est en ligne droite par Brouilla jusqu'à rejoindre l'autoroute A9 au niveau de Pollestres
- Au Nord-est à l'horizontale à partir de l'aéroport jusqu'au poste de Baixas.

La Figure 6 montre les environs du poste de Baixas, côté français, et le paysage environnant, tandis que le Figure 7 se rapporte à l'extrémité Sud du tronçon français au niveau de la tête du tunnel de la ligne TGV.

La zone d'étude est matérialisée sur la Figure 8 ci-après.

³ En particulier les conditions thermiques du milieu marin et terrestre sont différentes.



Figure 6 : Le poste de Baixas sur le plateau, vu de la route provenant du village de Baixas



Figure 7 : L'entrée du tunnel LGV, côté France



Figure 8 : Zone d'étude pour la liaison terrestre enfouie

3.2 Alternative d'enfouissement terrestre : analyse environnementale

L'analyse environnementale nécessaire pour mettre en évidence les enjeux d'une ligne enterrée entre les postes de Baixas et de Sta Llogaia a déjà été effectuée dans le cahier n.4 (rapport CESI A8011725).

Nous en résumons ici les principaux aspects :

Aspects	Tronçon français 	Tronçon espagnol 
MILIEU PHYSIQUE	<ul style="list-style-type: none"> • Prédominance d'un relief plat et bas • Plaine traversée d'Ouest en Est par la Têt (au Nord) et le Tech (au Sud). • Quelques ondulations en partie Sud (contreforts des Aspres) • La vallée du Tech, au Sud à peine plus pentue. • La chaîne des Albères culmine à une altitude assez élevée sauf au niveau du Col du Perthus (altitude 300 m environ). 	<ul style="list-style-type: none"> • Zone Nord et Ouest : présence de territoires à topographie variée, avec vallonnements importants en prévalence orientés dans la direction Ouest-Est, qui, même s'ils n'atteignent pas des altitudes très importantes, sont séparés par des escarpements raides et étriqués. • Au Sud et à l'Est : relief de collines plus doux • Plaine basse sillonnée de petites rivières dont la direction principale, initialement orientée Nord-Sud plie progressivement vers la mer, dans le sens Ouest-Est

Aspects	Tronçon français 	Tronçon espagnol 
OCCUPATION DU SOL	<ul style="list-style-type: none"> • 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. 	
MILIEU HUMAIN ET BÂTI	<ul style="list-style-type: none"> • Assez forte concentration sur une bande qui s'étire le long de la Têt, 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. • Absence d'habitations au nord de cette bande ; • Habitat assez clairsemé mais très réparti dans une assez large bande au sud de la Têt, (cultures maraîchères et fruitières) • En allant vers le sud, l'espacement entre villages augmente ; • A l'arrivée sur la vallée du Tech, forte concentration du bâti qui s'étend dans la vallée du Tech ; • A l'extrême sud, le bâti reste essentiellement concentré dans la trouée qui monte vers le Col du Perthus. 	<ul style="list-style-type: none"> • La seule zone de concentration importante est localisée autour de la ville de Figueras et la Jonquera, en forte expansion récente ; • Pour le reste : présence de petites villes et de villages clairsemés et de quelques rares habitations isolées, surtout dans les plateaux de montagne .
MILIEU NATUREL ET PAYSAGE	<ul style="list-style-type: none"> • Sites classés dans le cadre de Natura 2000. • SIC : Fiches humides de Torremilla, Le Tech; • ZPS voisines: Canigou – Conques de la Preste, Massif des Albères. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sites classés dans le cadre de Natura 2000 • SIC : Mont Alberes, Massis de les Salines, Pena Segats de la Muga, Garriga d'Empordà, Bassins de l'Albera, cours de la rivière Llobregat de l'Empordà, le parc naturel de Aiguamolls de l'Empordà et le Parc Naturel du Cap de Creus • ZICO : Pena Segats de la Muga, Garriga d'Empordà, parc naturel de Aiguamolls de l'Empordà, le Parc Naturel du Cap de Creus, les Monts Alberes et le Massis de les Salines

3.3 Zone d'étude pour l'alternative mixte terrestre sous-marine

3.3.1 Partie terrestre côté français

La zone d'étude de la partie terrestre d'une solution d'enfouissement mixte terrestre sous-marine est délimitée comme suit (Figure 12):

- au Nord, par les secteurs bâtis de Clairà, Saint Laurent-de-la-Salanque, Le Barcarès ;
- au Sud, par l'agglomération de Perpignan et les secteurs bâtis qui lui sont proches : Saint Estève, Château-en-Roussillon, Canet-en-Roussillon ;
- à l'Est et à l'Ouest, respectivement par le littoral et le poste électrique de Baixas.

La Figure 9 montre les abords de la rivière Agly, qui constitue une des voies possibles vers la mer ; la Figure 10 se rapporte à l'embouchure de la Têt, plus au Sud ; la Figure 11 nous déplace encore plus vers l'Espagne et montre la côte rocheuse vers Cerbère, à peine au Nord de la frontière espagnole.



Figure 9 : Agly et ses deux berges



Figure 10 : Embouchure de la Têt



Figure 11 : Côte rocheuse au niveau de Cerbère

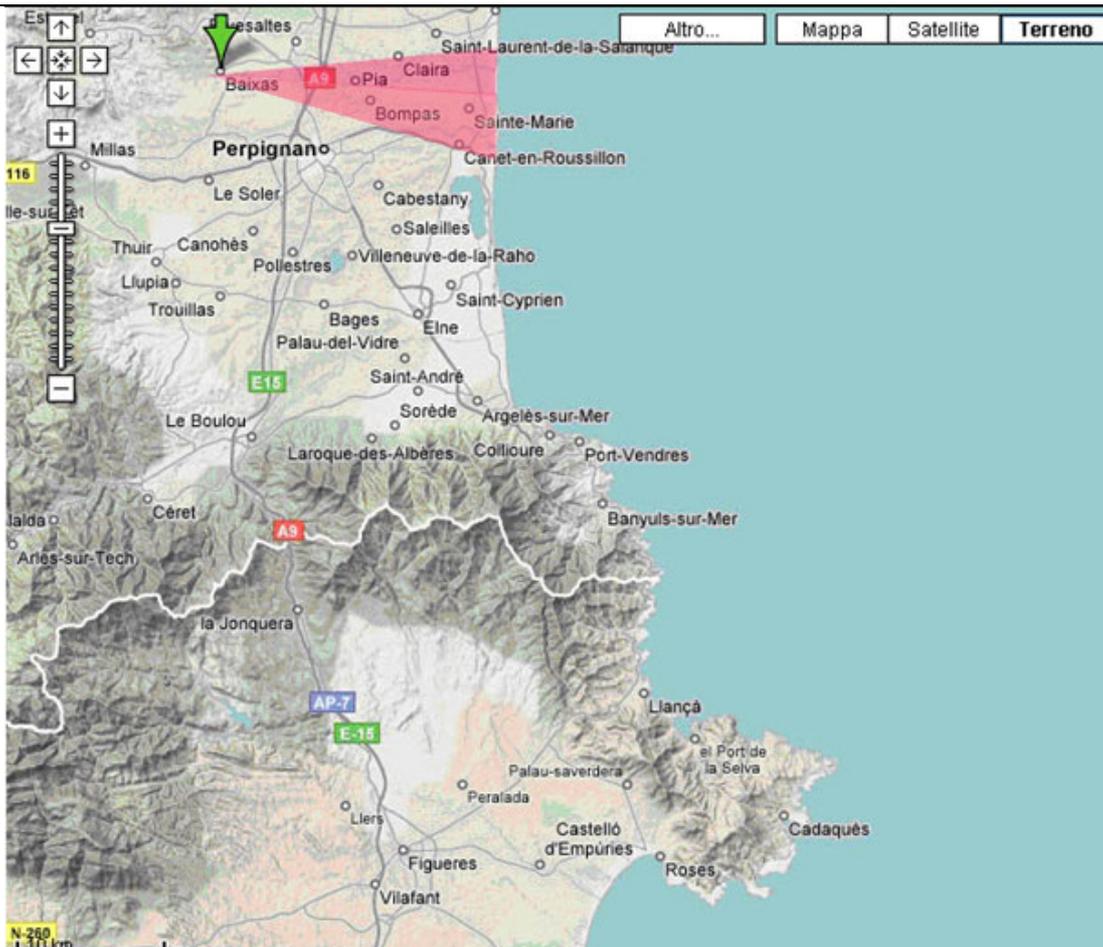


Figure 12 : Zone d'étude pour l'alternative mixte souterraine sous-marine : partie terrestre

3.3.2 *Partie sous-marine*

La zone d'étude de la partie sous-marine d'une solution d'enfouissement mixte terrestre sous-marine, d'une largeur de 8-10 km sur une longueur variable de 50 km à 100 km selon le point d'arrivée en Espagne (Llança ou Roses/Empuriabrava), a été délimitée de la manière suivante Figure 13 et Figure 14):

- au Nord, par le littoral et par l'isobathe - 50 m (située à près de 10 km de la côte)
- à la frontière, par le littoral et par l'isobathe - 100 m (située à 7 km environ de la côte)
- au Sud, par le littoral et par l'isobathe - 100 m (située à 8 km de la côte dans le cas de Llança et à 6 à 10 km de la côte dans le cas de Roses/Empuriabrava, mais à moins d'un kilomètre au large du Cap de Creus).

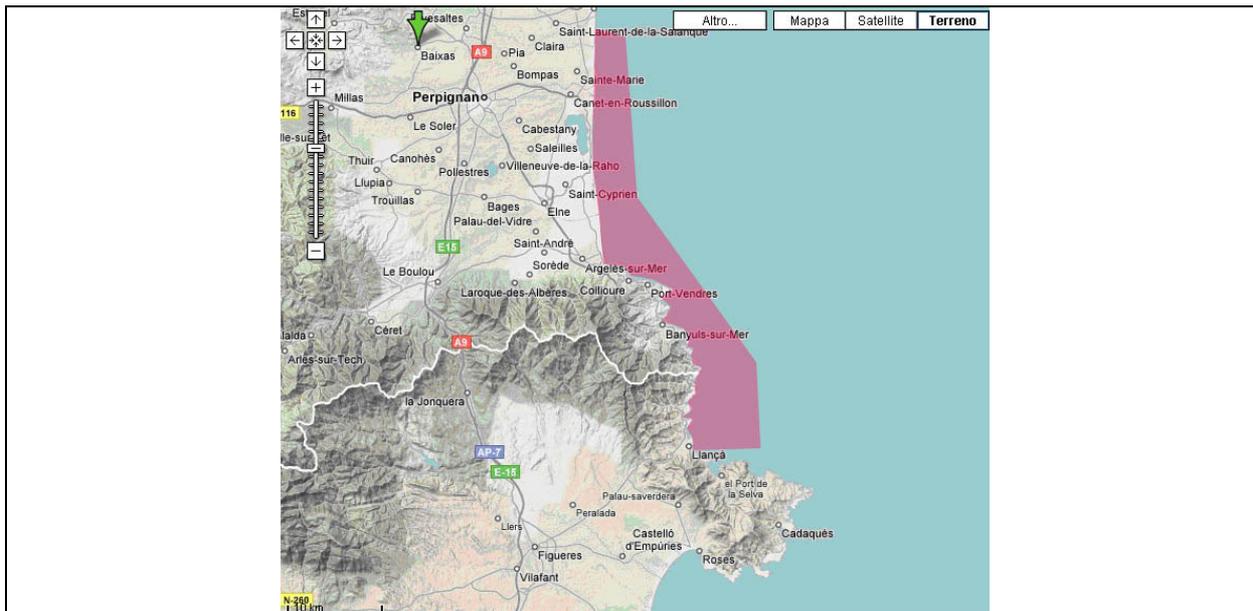


Figure 13 : Zone d'étude pour l'alternative mixte souterraine sous-marine : partie sous marine –arrivée à Llança

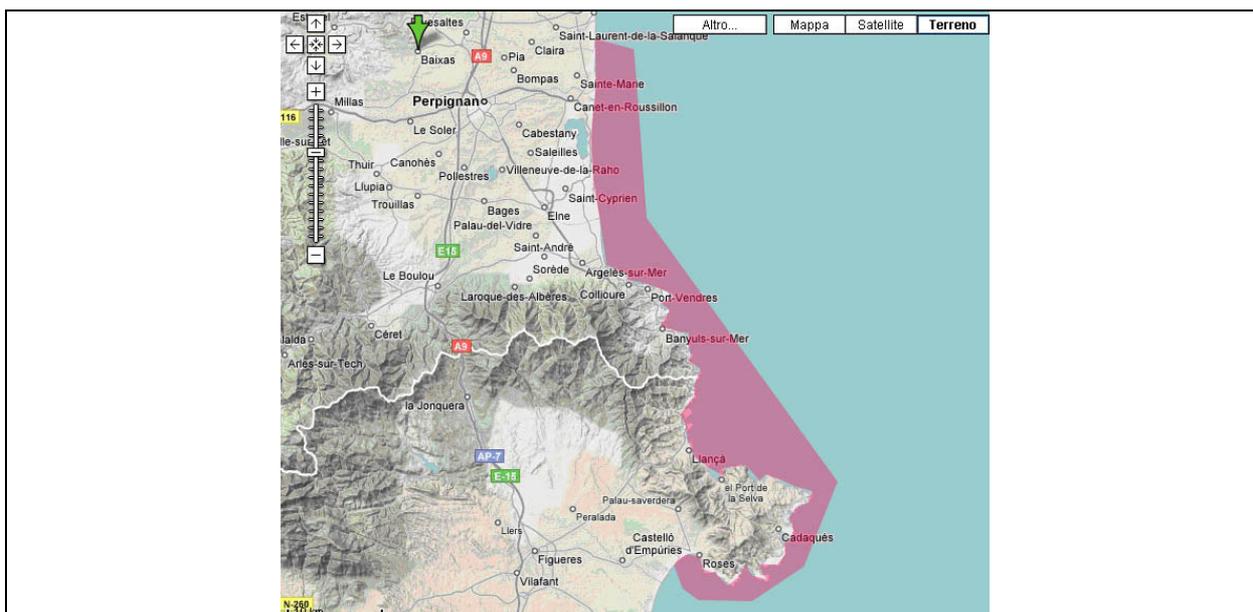


Figure 14 : Zone d'étude pour l'alternative mixte souterraine sous-marine : partie sous marine- arrivée à Roses/Empuriabrava

3.3.3 Partie terrestre côté espagnol

La complexité du territoire espagnol impose la recherche de solutions de compromis pour rejoindre la côte à partir du poste de Sta Llogaia : en effet, le long de la côte les sites classés du point de vue du milieu naturel alternent avec les agglomérations ayant une forte vocation touristique. Deux possibilités sont proposées comme point d'atterrage :

- Les environs de la ville de Llança, au Nord du Cap de Creus : cette alternative a l'avantage de minimiser la longueur de la partie sous-marine mais impose la traversée du Parc Naturel de les Albers ;
- Les environs de la Ville de Roses, au Sud du cap Creus, dans le Golfe de Roses : cette alternative allonge la partie sous-marine mais permet d'arriver à un point d'atterrage moins contraignant du point de vue environnemental, aux abords du parc Naturel des Aiguamolls de l'Alt Empordà

Toutes les alternatives d'atterrage à la côte du côté espagnol doivent tenir compte de la vocation fortement touristique de toute la Costa Brava, qui est parsemée de villages de plaisance alternant avec des zones protégées. Les Figures de 15 à 17 montrent des exemples de paysage aux abords de la mer pour trois localités prises en compte pour l'arrivée de la partie sous-marine en Espagne.



Figure 15 : Vue des abords maritimes de Llança



Figure 16 : Vue des abords maritimes de Port de la Selva



Figure 17 : Vue des abords maritimes de Roses

Les deux zones alternatives sont montrés dans la Figure 18.



Figure 18 : Zone d'étude pour l'alternative mixte souterraine sous-marine : partie terrestre côté espagnol

3.4 Alternative mixte souterraine sous-marine : analyse environnementale

Aspects	Tronçon français 	Tronçon espagnol 
MILIEU PHYSIQUE	<p style="text-align: center;">Partie terrestre</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zone plane avec altitudes faibles • Relief peu prononcé au Sud de la vallée de la Têt • Deux fleuves majeurs : Agly au Nord et Têt au Sud tous deux orientés d'Ouest vers l'Est • Des ramifications des fleuves sont présentes <p style="text-align: center;">Partie maritime</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fonds marins très plats et sablonneux au Nord ; • Pénétration du massif pyrénéen en mer avec fond rocheux et pente abrupte – isobathe -100 m se situant à 6-7 km de la côte • Zone soumise à d'importants courants marins et à des mouvements de sédiments 	<p style="text-align: center;">Partie terrestre</p> <ul style="list-style-type: none"> • La cordillère des Pyrénées, au Nord et à l'Est, constitue un arc quasi continu qui sépare la plaine de la mer ; le relief rejoint par points les + 600m et est caractérisé par des escarpements abrupts et des vallées étroites qui donnent naissance aux cales de la côte; • L'orographie est caractérisée par des reliefs moins importants vers l'Est • A l'intérieur de cet arc se trouve la dépression de l'Ampurdàn au Sud qui forme une plaine qui s'ouvre vers la mer à l'extrémité Sud de la zone d'étude (vers Empuriabrava) en formant des lagunes et des zones marécageuses • Cours d'eau : Rio Muga, se développe dans la plaine d'Ampurdàn sur un tracé assez régulier, il recueille les eaux des cours d'eau provenant du massif des Albères ; les rivières qui forment les Aiguamolls d'Empurdàn, de longueur assez brève ; les rivières qui sont alimentées par les torrents au Nord de Roses, ont une caractéristique de cours d'eau torrentiel ; <p style="text-align: center;">Partie maritime</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fonds marins très complexes et caractérisés par des canyons et des reliefs sous marins pointus, chaotiques et avec des dénivelés importants. On rejoint les isobathes de -200 m à moins de 5 km de la côte. • Zone soumise à d'importants courants marins et à des mouvements de sédiments

Aspects	Tronçon français 	Tronçon espagnol 
MILIEU HUMAIN ET BATI	<p style="text-align: center;">Partie terrestre</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bâti très présent notamment sur la partie centrale (agglomération de Perpignan) et à proximité du littoral • Bâti aggloméré correspondant aux centres des villages • Bâti diffus en périphérie des agglomérations • En proximité de Perpignan : présence de grosses infrastructures : aéroport, TGV, autoroute A9, projet de rocade Ouest de Perpignan • Zone industrielle et tertiaire au nord de Perpignan • Zones agricoles : vignes à l'Ouest, vignes, vergers, maraîchages au centre et à l'Ouest <p style="text-align: center;">Partie maritime</p> <ul style="list-style-type: none"> • Trois routes maritimes principales issues de Port-Vendres • Activité de pêche (chalutage) à partir d'une certaine distance de la côte ou de pêche côtière artisanale ; • Activités liées à la plaisance et à la proximité des stations touristiques • Zone militaire au Nord de Banyuls 	<p style="text-align: center;">Partie terrestre</p> <ul style="list-style-type: none"> • La zone d'étude présente une densité de bâti relativement faible, avec deux types de localités prépondérantes : de nombreuses localités de petite ou moyenne dimension, surtout dans la plaine de l'Ampurdàn , la ville de Figueres et les zones côtières comme Llança, Port de la Selva, Roses, l'agglomération de Ampuriabrava, Cadaques, l'Escala qui représentent les principaux centres touristiques du Nord de la Costa Brava ; • Ces localités de la côte sont fortement tributaires du tourisme et occupent tout le territoire disponible entre les zones protégées du point de vue environnemental ; • Les localités plus éloignées de la côte et proches des zones montagneuses connaissent un tourisme mixte comprenant tant les activités de plaisance que d'excursions en montagne ; • Les zones situées en territoire plus ouvert ont une activité agricole significative et les zones de forêt maintiennent une valeur importante du point de vue du paysage ; • La ville de Figueres et ses alentours a connu un développement significatif dans le secteur tertiaire et industriel et une population croissante ; • La zone comprise entre l'autoroute AP-7 et l'ancienne route nationale II sont particulièrement importantes du point de vue industriel. <p style="text-align: center;">Partie maritime</p> <ul style="list-style-type: none"> • Activité de pêche (chalutage) à partir d'une certaine distance de la côte ou de pêche côtière artisanale ; • Activités liées à la plaisance et à la proximité des stations touristiques.

Aspects	Tronçon français 	Tronçon espagnol 
MILIEU NATUREL ET PAYSAGE	<p style="text-align: center;">Partie terrestre</p> <ul style="list-style-type: none"> • Milieu naturel : deux zones ZNIEFF (Bourdigou, ripisylve de la Têt), trois sites Natura 2000 : friches humides de Torremilla (SIC), complexe lagunaire de Salses (SIC), complexe lagunaire de Salses-Leucate (ZPS) • Patrimoine : quelques sites ou monuments protégés, des espaces sensibles au titre de la Loi Littoral (dunes, landes côtières, falaises, forêts, notamment à l'embouchure de l'Agly), espaces acquis par le Conservatoire du Littoral ; toutes les communes du littoral sont des stations touristiques réputées. <p style="text-align: center;">Partie maritime</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sensibilité paysagère de plus en plus forte vers le Sud • Acquisition du Conservatoire du Littoral (Tech) • Sites protégés en bordure du littoral • Espaces sensibles au titre de la Loi Littoral (Bourdigou, Mas de la Croustre, étang de Canet/St. Nazaire, Cap Béar) • Deux sites Natura 2000 (embouchure du Tech (SIC), Posidonies de la Côte des Albères (SIC)) ; deux ZNIEFF (embouchure du Tech, cap Béar), une zone coralligène éparse, une réserve marine (Cerbère-Banyuls) • Présence de cétacés avec sensibilité croissante • Au large de la côte profondeurs 200-300m on trouve des canyons dont la bordure supérieure recèle une grande richesse floristique et faunistique en raison des courants qui s'y produisent • Projet de Parc Naturel Marin 	<p style="text-align: center;">Partie terrestre</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'écosystème côtier présente une situation très bonne avec des indices de conservation très intéressants (sauf aux environs proches des zones à vocation plus touristiques qui sont exposées à une surexploitation due à la présence touristique. • Les zones internes sont traditionnellement vouées à l'exploitation forestière des bois locaux (espèces méditerranéennes) . Les forêts et les bois recouvrent les versants des collines et des montagnes avoisinantes ; un grand nombre de ces espèces sont incluses dans les listes de la >Directive 92/43 : certains comme prioritaires, d'autres comme non prioritaires • On peut constater la présence d'espèces faunistiques d'intérêt comme les oiseaux rapaces ; • Très importants du point de vue naturel sont les Aiguamolls del Ampurdan, qui constituent une des zones humides les plus importantes de la région catalane après l'embouchure de l'Ebro. On y constate la présence d'une importante avifaune, spécialement de type migratoire. C'est un des Parcs naturels les plus importants de la Costa Brava. <p style="text-align: center;">Partie maritime</p> <ul style="list-style-type: none"> • On y constate une série d'habitats de grande valeur comme les prairies de posidonies qui sont classées comme ayant intérêt communautaire prioritaire dans le cadre des sites classés Natura 2000. • Ces formations se présentent au large le long de toute la zone d'étude jusqu'à une profondeur de -35m ; • Présence de nombreuses espèces piscicoles de rocher très prisées du point de vue culinaire ainsi qu'une population intéressante de crustacés.

3.5 Comparaison des alternatives

Le tableau ci-dessous permet de synthétiser les éléments de comparaison entre les solutions d'enfouissement terrestre, et mixte souterraine – sous-marine.

COMPARAISON ENVIRONNEMENTALE DES 2 FAMILLES DE SOLUTIONS		
	ENFOUISSEMENT TERRESTRE	ENFOUISSEMENT MIXTE (Terrestre / sous-marine)
MILIEU PHYSIQUE	<p> Traversée des 2 fleuves, la Têt et le Tech (utilisation de techniques maîtrisées - ensouillage et forage dirigé)</p> <p> Zones de pente au niveau des Albères. Deux solutions à l'étude : le tunnel ou la tranchée en évitant les secteurs de forte pente (passage à l'Ouest du Perthus)</p> <p> Traversée des 1 ou 2 fleuves, suivant le tracé (la Muga et le Llobregat du Ampurdan) (utilisation de techniques maîtrisées – ensouillage et forage dirigé)</p> <p> Traversée d'une zone en plaine (plaine de l'Ampurdan) qui suit le trajet de l'autoroute</p> <p> Topographie plus difficile le long de la vallée du Llobregat du Ampurdan et de ses alentours.</p>	<p>Partie terrestre</p> <p>  Pas de zone de pente au niveau de la partie terrestre</p> <p>  Tracé positionné dans les berges ou les chemins en bordure de l'Agly (ou le fleuve Têt en option).</p> <p> Les deux options (Llança ou Empuriabrava) ont une grande différence de topographie, l'alternative Sud ne se trouve pas en zone à fortes pentes, tandis que l'alternative au Nord doit traverser de zones abruptes</p>
	<p>Partie sous-marine</p> <p>  La nature des fonds marins ainsi que les pentes ne semblent pas présenter des difficultés insurmontables même si les pentes sont plus abruptes au large de la Côte Vermeille.</p> <p> La nature des fonds marins présente des pentes très fortes, et avec des zones avec des rochers abrupts, qui présentent des risques importants d'endommagement des câbles. Il ya des zones où l'implantation des câbles peut être impossible</p>	

	ENFOUISSEMENT TERRESTRE	ENFOUISSEMENT MIXTE (Terrestre / sous-marine)
MILIEU NATUREL	<p> Site Natura 2000 de la vallée du Tech : franchissement en utilisant des techniques maîtrisées (ensouillage, forage dirigé.)</p> <p> Impact modéré sur la ZNIEFF des Albères (dans le cas d'une solution en tranchée)</p> <p> Il est possible d'arriver jusqu'à la frontière sans traverser aucune zone protégée.</p> <p> Il faut traverser des zones boisées dans la zone finale du tracé.</p> <p> Impact modéré sur la SIC et ZICO des Salines (dans le cas d'une solution en tranchée)</p>	<p>Partie terrestre</p> <p>  Un passage par l'Agly impacte un site Natura 2000 (FR 910 1463).</p> <p>  Un passage par la Têt impacte également fortement la ripisylve de ce fleuve (ZNIEFF de type 2)</p> <p> Le passage par le Nord (Llança) impacte un lieu Natura 2000 et ZICO (Les Albères) sur 4-5 km. Il est nécessaire de traverser des zones boisées sur une longueur de presque 10 km.</p> <p> Le passage par le Sud (Empuriabrava) implique de traverser un site Natura 2000 et la ZICO les Aiguamolls de l'Ampurdan.</p> <p> La végétation des zones humides dans les Aiguamolls peut être affectée</p> <hr/> <p>Partie sous-marine</p> <p>  Passage obligé au large des herbiers de Posidonie (site Natura 2000) et de la réserve naturelle de Cerbère-Banyuls</p> <p>  Difficulté importante d'implanter un câble marin THT dans une zone entièrement vouée à devenir un Parc Naturel marin</p> <p>  Impact sur les mammifères marins difficile à apprécier</p> <p> Passage obligé au large des herbiers de Posidonie (site Natura 2000)</p> <p> Impact sur les mammifères marins difficile à apprécier et impacts sur les espèces piscicoles locales</p>

	ENFOUISSEMENT TERRESTRE	ENFOUISSEMENT MIXTE (Terrestre / sous-marine)	
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">MILIEU HUMAIN</p>	<ul style="list-style-type: none">  • Bâti principalement dans les vallées de la Têt et du Tech, et quelques localités (Baho, Maureillas, etc)  Impact agricole modéré sur des zones viticoles, arboricoles et de maraîchage  Possibilités de longer des infrastructures existantes orientées Nord/Sud.  Il est possible de choisir un tracé éloigné des villages.  Impact agricole modéré sur des zones arboricoles et agricoles.  Possibilités de longer des infrastructures existantes orientées Nord/Sud. 	<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Partie terrestre</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Bâti principalement au niveau de Peyrestortes et Rivesaltes (également Baho et zone industrielle Nord de Perpignan pour l'option vallée de la Têt) • Impact agricole modéré sur des zones viticoles, et éventuellement de maraîchage • Pas de réelle possibilité d'utiliser des infrastructures existantes • Bâti principalement au niveau de Figueres et surtout dans les villes de la côte. A l'endroit de connexion à la partie sous-marine il s'avère nécessaire de passer à travers des village à vocation touristique si on ne veut pas affecter les zones protégées.  Impact agricole modéré sur des zones arboricoles et agricoles  Pas de réelle possibilité d'utiliser des infrastructures existantes
			<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Partie sous-marine</p>

	ENFOUISSEMENT TERRESTRE	ENFOUISSEMENT MIXTE (Terrestre / sous-marine)
PATRIMOINE ET PAYSAGE	<p> Impact paysager très faible (principalement en phase chantier et pendant la période nécessaire à la cicatrisation)</p> <p> Impacts sur des gisements archéologiques liés à la présence de la Via Domitia au sud du Boulou</p> <p> Impact paysager faible (principalement en phase chantier et pendant la période nécessaire à la cicatrisation)</p> <p> Impacts potentiels sur des gisements archéologiques liés à la présence de la Via Augusta</p>	<p>Partie terrestre</p> <p>  Impact paysager très faible (principalement en phase chantier et pendant la période nécessaire à la cicatrisation)</p> <p>  Impacts sur des gisements archéologiques liés à la présence de la Via Domitia à l'est de Bompas</p> <p> Impact paysager très fort lors de la traversée des Albères (principalement en phase chantier et pendant la période nécessaire à la cicatrisation)</p> <p> Impacts potentiels sur des gisements archéologiques</p>
		<p>Partie sous-marine</p> <p>  En passant à plus de 3 milles nautiques de la Côte Vermeille, les nombreux sites protégés (sites classés, acquisitions du Conservatoire du Littoral...) ne sont pas impactés</p> <p> La présence du port de Ampuries, site datant de l'époque grecque, laisse supposer la présence de sites archéologiques dans la zone maritime</p>

3.5.1 Longueurs des couloirs

- Alternative souterraine :
 - **Longueur totale : environ 60 km** (environ 35 km en France, 25 km en Espagne)
- Alternative mixte terrestre-sous-marine :
 - Partie terrestre côté français : 25 km (la distance minimale à vol d'oiseau du poste de Baixas au littoral est de 20 km)
 - Partie sous-marine (alternative Llança) : 50 km
 - Partie sous-marine (alternative Empuriabrava) : 90 km
 - Partie terrestre côté espagnol (alternative Llança) : 30 km
 - Partie terrestre côté espagnol (alternative Empuriabrava) : 18 km
 - **Longueur totale (alternative Llança) : 105 km** (soit plus de 50% de longueur en plus que la solution d'enfouissement terrestre) **dont 50 km en sous-marin**
 - **Longueur totale (alternative Empuriabrava) : 135 km** (soit plus du double de la longueur de la solution d'enfouissement terrestre) **dont 90 km en sous-marin**

3.5.2 Synergies possibles avec d'autres infrastructures

- La solution d'enfouissement terrestre offre, sur la quasi totalité de sa longueur, des possibilités de jumelage avec d'autres grandes infrastructures linéaires existantes (voir Figure 19) : ligne LGV, autoroute A9, autopista A7, infrastructure routière (D 900, Carretera nacional II etc.). De ce fait, les impacts s'en trouveraient notablement diminués.



Figure 19 : L'aire du Village Catalan, où autoroute, LGV et D 900 se côtoient

- Ces possibilités ne sont pas aussi importantes pour la partie terrestre de la solution d'enfouissement mixte terrestre – sous-marine ; il n'y a en effet pas d'infrastructure du même type entre le poste de

Baixas et le littoral ou entre le poste de Sta Llogaia et la côte. Les fleuves Agly et Têt pourraient toutefois permettre une telle synergie, en France, sous réserve d'accepter l'installation d'une ligne électrique dans leur lit, ou un cheminement sur les chemins latéraux ou sur les digues (lorsqu'ils existent). L'expérience récente d'installations de ce type en Espagne (p.ex. la liaison en câble enfoui avec le Maroc) a démontré que l'utilisation des lits de fleuves et rivières peut s'avérer fort aléatoire.

- De plus la zone d'étude à l'Est de Figueres (Santa Llogaia) ne dispose pas d'infrastructure linéaire facile à longer

3.5.3 Incertitudes et aléas

On remarquera enfin que, si la solution d'enfouissement terrestre est une solution maîtrisée, même si pour la traversée des Pyrénées (pour les Albères ou le massif des Salines) le choix technique entre la tranchée et le tunnel n'est pas finalisé, celle d'enfouissement mixte terrestre – sous-marine souffre d'un certain nombre d'incertitudes techniques ou réglementaires :

- la dynamique des fleuves côtiers (Tech, Têt, Muga et petits fleuves qui versent au Nord du Cap de Creus en cas de crues) et la stabilité des berges posent question quant à l'usage des lits des fleuves ou de leurs digues, pour la partie terrestre de l'enfouissement ; de même, cette dynamique à l'embouchure et l'évolution des fonds marins et donc des transports de sédiments doit être examinée pour assurer la pérennité de la liaison à proximité de la côte ou un peu plus au large.
- la nature des fonds rocheux est un point à examiner attentivement, au regard de son agressivité mécanique potentielle sur les câbles, au transport de sédiments dépendant à la fois de l'apport des fleuves côtiers, de la houle, et des différents courants marins ; il faut remarquer en outre qu'aucune cartographie détaillée des matériaux susceptibles d'être rencontrés au niveau du plateau continental n'est disponible, mais il est un fait qu'on se trouve en présence d'abondantes zones rocheuses et de fortes pentes que peuvent rendre impossible la solution dans la zone de transition mer-terre;
- la Loi Littoral, en France, qui s'applique sur la totalité des communes côtières laisse planer, à ce stade, une grande incertitude sur les possibilités réglementaires d'implanter une liaison électrique sous-marine, en raison des « espaces remarquables » qui bénéficient, à ce titre d'une protection maximale. De même, la présence en Espagne de nombreuses localités à vocation touristique très marquée ou de sites environnementalement sensibles rendent la possibilité de réalisation d'une telle solution très aléatoire.

En conclusion, pour les raisons que nous résumons ci-après:

- **la longueur des couloirs (et en particulier la longueur des tronçons terrestres) est nettement moins importante dans l'alternative enfouie terrestre ;**
- **l'alternative enfouie terrestre permet d'exploiter les couloirs de plusieurs autres infrastructures présentes ou en cours de réalisation (routes, autoroutes, voies ferrées etc.) favorisant leur développement synergique;**
- **le parcours vers la mer, surtout du côté espagnol, comporterait la traversée de zones protégées et/ou de zones à vocation touristique,**

dans l'état actuel de nos connaissances et de nos investigations, la solution d'enfouissement terrestre nous paraît être la solution la plus réaliste et la moins impactant sur l'environnement.