

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

**Sujet** Analyse de la possibilité de prolonger à sud de Sta Llogaia la liaison transfrontalière enfouie. Cahier n° 5 bis

### Commande

**Notes** version originale en langue française

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

**N. de pages** 9

**N. de pages annexées:** 0

**Date d'émission:** juin 2008

**Prepared** IMP - Cova Bruno  
A8016548 2982 ALIT  
Michele de Nigris (CESI RICERCA)

**Verified** SIS - Ardito Antonio  
A8016548 2935 VER

**Approved** SIS - Il Responsabile - Ardito Antonio  
A8016548 2935 APP

PUBBLICATO A8016548 (PAD - 1063424)

Mod. RAPP v. 01

*Table des matières*

<b>1</b>	<b>AVANT-PROPOS .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>ANALYSE DE LA FAISABILITE DE REALISATION D'UNE LIAISON ENFOUIE AU SUD DE STA. LLOGAIA.....</b>	<b>3</b>
2.1	Transformation CC/CA à Sta Llogaia et câbles enterrés en CA à 400 kV entre Sta. Llogaia et Bescano .....	4
2.2	Solution en CC enterrée jusqu'à Bescano' avec conversion CA/CC à thyristors .....	6
2.3	Solution en CC enterrée jusqu'à Bescano' avec conversion du type VSC.....	7
<b>3</b>	<b>CONSIDERATIONS FINALES .....</b>	<b>8</b>

## 1 AVANT-PROPOS

Puisque le « projet d'intérêt européen » tel qu'il est défini dans la Décision 1364/2006/EC du Parlement Européen et du Conseil se poursuit au sud de Sta Llogaia jusqu'à Sentmenat, les associations du côté espagnol ont demandé d'analyser la faisabilité de prolonger la ligne en courant continu enfouie jusqu'au poste déjà existant de Bescano'. L'analyse de faisabilité de cette solution considérera les aspects strictement techniques (flux de puissance, niveau du courant de court circuit, standards de qualité de la fourniture) sur la base des informations mises à disposition par REE.

## 2 ANALYSE DE LA FAISABILITE DE REALISATION D'UNE LIAISON ENFOUIE AU SUD DE STA. LLOGAIA

Le projet de l'axe d'interconnexion de Baixas à Sentmenat conçu par les Gestionnaires de Réseau Français et Espagnol est illustré dans la Fig. 2-1. Le projet est constitué par plusieurs tronçons dont les longueurs indicatives dans le cas de la solution terrestre sont les suivantes:

- Baixas-Sta. Llogaia :  $\approx 60$  km
- Sta. Llogaia-Bescano :  $\approx 30$  km
- Bescano-Vic :  $\approx 44$  km
- Vic-Sentmenat :  $\approx 35$  km.

Un nouveau poste d'alimentation pour le TGV est prévu à Riudarenes entre Bescano' et Vic. Le poste sera alimenté au moyen d'une ligne double terne à 400 kV ayant une longueur de 17 km.

Pour le tronçon transfrontalier on a proposé une solution enfouie en courant continu. La tension pour ce type de solution doit encore être définie. En considération de la taille de l'interconnexion (valeur de référence d'au moins 1400 MW) la tension nominale en courant continu pouvant être choisie parmi les niveaux  $\pm 400$  kVcc et  $\pm 500$  kVcc sur la base de l'optimisation des coûts d'investissements et d'exploitation (hypothèse de solution en courant continu à thyristors). Au sud de Sta Llogaia la ligne aérienne à 400 kV serait constituée de deux circuits standards, c'est-à-dire selon les paramètres adoptés par le Gestionnaire du Réseau dans toutes les installations de ce type dans le territoire péninsulaire espagnol. Les postes intermédiaires de Sta. Llogaia et Riudarenes sont utilisés pour l'alimentation du TGV avec une absorption maximale déséquilibrée d'environ 30 MW en conditions normales, mais qui peut atteindre 50 MW. En correspondance de ces valeurs de charge déséquilibrée, il faut garantir un niveau minimal de puissance de court circuit dans les points d'alimentation afin de garder le déséquilibre de tension en-dessous de 0.7%, qui est la valeur maximale acceptable par REE.

En réalité le poste de Sta Llogaia sert à la fois à l'alimentation du TGV et à renforcer le réseau de distribution à 132 kV dans la partie nord de la province de Gérone, grâce à un nouveau transformateur 400/132 kV.

Une autre poste intermédiaire, Ramis, est utilisé pour l'alimentation de la charge locale au moyen de deux nouveaux transformateurs 400/220 kV et de la conséquente injection de puissance du niveau de tension 220 kV au niveau 132 kV à Ramis et Juia aussi bien que 110 kV à Juia.

De plus, il y a la possibilité d'installation de nouvelle production à Ramis (cycle combiné de 145 MW).

D'une façon générale, le tronçon "Sentmenat - Sta Llogaia" a une double fonction : il sert à la fois à sécuriser l'approvisionnement de cette partie de la Catalogne isolée électriquement du reste de l'Espagne

et peut être réalisé indépendamment du tronçon "Sta Llogaia-Baixas" auquel il se connecte permettant également d'approvisionner la Catalogne (et de l'Espagne en général) via la France. En effet, tout en considérant que la situation de l'approvisionnement dans la région de Gérone est de plus en plus critique, l'Administration Centrale, Régionale et Locale Espagnole et REE ont décidé de démarrer la réalisation du tronçon Sentmenat-Vic-Bescano'-Sta. Llogaia avant celle du tronçon transfrontalier.

Selon les informations fournies par le Gestionnaire de Réseau Espagnol, le tronçon Sentmenat-Vic-Bescano' est déjà en construction avec une configuration en ligne aérienne à 400 kV double terre. Il est prévu que l'ensemble de la section Sentmenat-Vic-Bescano' soit mis en service pour le mois de juin 2009.

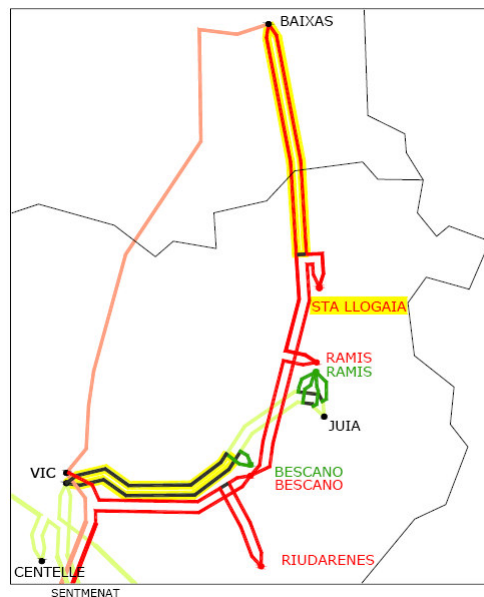


Fig. 2-1 Possible tracé de la nouvelle liaison terrestre Baixas-Sentmenat (source RTE et REE)

Pour prolonger la liaison en solution terrestre enfouie au sud de Sta Llogaia jusqu'à Bescano' on pourrait considérer les solutions suivantes:

- transformation CC/CA à Sta Llogaia et câbles enterrés en CA à 400 kV;
- solution en CC enterrée jusqu'à Bescano' avec conversion CA/CC à thyristors;
- solution en CC enterrée jusqu'à Bescano' avec conversion du type VSC.

## 2.1 Transformation CC/CA à Sta Llogaia et câbles enterrés en CA à 400 kV entre Sta. Llogaia et Bescano

L'alternative à une solution aérienne à 400 kV à double circuit au sud de Sta Llogaia pourrait consister dans la réalisation d'un tronçon en câbles enterrés jusqu'à Bescano'. La solution en câbles enterrés devrait garantir:

- la pleine puissance transitée du tronçon en courant continu, tout en respectant les conditions de sécurité N-1 selon les critères adoptés par UCTE, c'est-à-dire qu'aucune restriction de flux de puissance sur l'interconnexion ne doit se vérifier face à un défaut d'un câble en CA ;
- un niveau minimum de puissance de court circuit à Sta Llogaia pour limiter le déséquilibre des tensions en dessous du seuil de 0.7%, qui représente le standard adopté par REE.

Pour garantir une puissance transitée d'au moins 1400 MW et en tenant compte du critère de sécurité N-1, on peut envisager au moins trois tricâbles de capacité d'environ 1000 MVA chacun (ex. câbles

XLPE en cuivre de section 1600 mm<sup>2</sup> chacun). De cette façon, face à un défaut d'un tricâble il serait quand même possible de garantir la pleine capacité de transport sur la liaison en courant continu.

La solution de trois tricâbles est acceptable à condition que dans le poste de Sta. Llogaia un niveau de puissance de court circuit en dessus d'un seuil minimal soit respecté<sup>1</sup>. Dans le cas de solution aérienne la valeur minimale de puissance du courant de court circuit (pour une période de 99% du temps) estimée à Sta Llogaia en 2011 est de 5900 MVA. Cette valeur doit être respectée aussi dans le cas de solution en câbles.

Une autre condition qui doit être respectée concerne la compensation de la puissance réactive générée par les câbles à THT. Ces câbles sont caractérisés par une capacité très élevée vers la terre qui équivaut à une production d'environ 150 Mvar pour chaque tricâble sur une longueur de 10 km. En accord aux règles adoptées par REE cette production de puissance réactive doit être totalement compensée (échange nul de puissance entre câbles et réseau) au moyen de selfs installées aux deux extrémités des câbles. Dans le cas spécifique du tronçon Sta Llogaia-Bescano' il est donc à prévoir une installation totale de 1350 Mvar de selfs (ou jusqu'à 1800 Mvar dans le cas où l'installations de quatre tricâbles s'avérerait nécessaire). Ces dispositifs pourront être installés aux postes d'extrémité Sta. Llogaia et Bescano' ou, en alternative, on peut envisager une distribution de l'installation des selfs dans les trois postes : Sta. Llogaia, Ramis et Bescano'. L'installation de selfs de compensation d'une taille de 150 Mvar requiert une occupation de terrain d'environ 2000 m<sup>2</sup> avec une hauteur approximativement de 9-10 m. Ainsi, l'impact sur le paysage n'est pas négligeable même dans le cas de solution enterrée jusqu'à Bescano'.

Un aspect additionnel qui ne doit pas être oublié dans la phase de projet consiste dans l'interaction entre les selfs de compensation des câbles en CA et les filtres de compensation installés dans le poste de conversion CC/CA de Sta. Llogaia. L'installation de selfs et de filtres dans le même poste pourrait donner lieu à des flux non souhaités de puissance réactive (ce qui cause aussi des pertes de puissance active) et, parfois, le risque de résonance entre réactances et capacités. Par conséquent, dans la préparation des cahiers des charges et des spécifications du projet il faut mettre en évidence les possibles conditions opérationnelles qui pourraient se vérifier et les contraintes liées aux échanges de puissance réactive de façon à permettre au constructeur de réaliser un système de contrôle adéquat pour l'exploitation des moyens de compensation de la puissance réactive, notamment les conditions de déclenchement et enclenchement.

Enfin, il est à souligner que l'alimentation de la ligne TGV doit être garantie même en condition de défaut d'un composant de réseau (sécurité N-1). Dans le cas de liaison enterrée en CA jusqu'à Bescano' l'alimentation serait fournie au moyen de câbles, qui présentent un taux de défaillance plus faible que celui des lignes aériennes, mais qui ont des temps de réparation très longs, de l'ordre de 3-4 semaines. Pourtant les standards de qualité de la fourniture du TGV doivent être garantis pendant toute la période de hors service d'un câble. Par conséquent, dans le cas où la PCC était trop faible pour rester en-dessous du seuil de dissymétrie 0.7%, il faudrait envisager la présence d'un câble supplémentaire de réserve pour chaque tricâble installé.

Naturellement le problème de ne pas être en condition d'alimenter le TGV tout en respectant les standards de qualité de la fourniture à cause du défaut d'un câble enterré ne se poserait pas dans le cas où le tronçon transfrontalier était en CA.

---

<sup>1</sup> Pour ne pas dépasser le seuil de déséquilibre de 0.7%.

## 2.2 Solution en CC enterrée jusqu'à Bescano' avec conversion CA/CC à thyristors

Une alternative à la solution en CC jusqu'à Sta Llogaia et CA jusqu'à Bescano' consiste dans la réalisation d'une liaison en CC enterrée de Baixas jusqu'à Bescano'. Cependant cette alternative présente des complexités remarquables étant donné la nécessité d'alimentation dans les postes intermédiaires de Sta. Llogaia et Ramis. En effet, l'utilisation de liaisons en CC est normalement associée au transfert de puissance de point à point. L'alternative de réaliser une connexion de point à point entre Baixas et Bescano' impliquerait le développement en parallèle d'un réseau de transport en CA, et, donc, une duplication non nécessaire de réalisation d'ouvrages électriques avec un impact plus important sur l'environnement.

Par conséquent, la liaison en CC devrait être nécessairement du type multiterminaux (quatre terminaux). Au niveau mondial les liaisons en CC multiterminaux sont très rares à cause de la complexité de leur système de contrôle (coordination en fonctionnement normal et d'urgence, procédures d'inversion du flux de puissance, déclenchement et enclenchement d'un terminal, etc.). En effet, actuellement il existe une seule expérience de liaison tri-terminale (Sardaigne-Corse-Italie continentale de taille 300 MW) et une seule expérience de liaison quadri-terminale (Québec-Nouvelle Angleterre de taille 2000 MW).

En réalité, même si ces liaisons présentent un intérêt certain en terme de contrôle des flux d'énergie dans un réseau, elles comportent également certains inconvénients. Plus spécifiquement, si l'on désire que chacune des quatre extrémités puisse fonctionner à la demande en soutirage ou en injection d'énergie, avec des puissances élevées, il faut recourir à un système de contrôle-commande complexe pour assurer le pilotage coordonné de chaque convertisseur en tension et en courant. Cette complexité se traduit par un risque d'incidents d'exploitation plus fréquents, et donc par une baisse de la disponibilité de la liaison. Or, dans un contexte de renforcement d'une interconnexion jugée aujourd'hui insuffisante, on recherche au contraire la plus grande fiabilité et disponibilité du lien supplémentaire.

Si, pour éviter l'écueil précédent, on imposait un sens de transit et une faible puissance pour une des stations d'extrémité (cas typique d'une station de soutirage intermédiaire), celle-ci devrait tout de même être dimensionnée pour une tension d'exploitation et un niveau de courant de défaut identiques à celui des stations des extrémités de forte puissance. Le coût de cette station serait donc particulièrement élevé par rapport au service rendu, ce qui rendrait la solution économiquement peu pertinente.

De plus, ces solutions sont du type à thyristors qui, pour fonctionner, nécessitent d'un réseau « actif », c'est-à-dire déjà en tension en étant alimenté par d'autres générateurs, et avec un niveau minimum de courant de court circuit pour garantir la stabilité de la tension.

Ce problème se pose en particulier dans les postes de Sta. Llogaia et Ramis (surtout à Sta. Llogaia qui a des valeurs de puissance de court circuit très faibles) qui ne resteraient alimentés qu'à travers les câbles CC en entrée et sortie et au moyen du faible réseau à 132 kV et 220 kV respectivement. Il faudrait donc renforcer le réseau en CA (ex. du poste de Juia si le niveau de courant de court circuit est suffisamment fort) jusqu'à Sta. Llogaia pour avoir un réseau en CA suffisamment fort pour alimenter le TGV et afin de permettre le fonctionnement du poste de conversion CC/CA (le paramètre ESCR<sup>2</sup> doit avoir une valeur au moins égale à 2÷3 pour garantir une stabilité de la tension acceptable).

En conclusion, il serait nécessaire d'installer une usine de génération (ou en alternative une compensation synchrone) à Sta Llogaia et à Ramis pour garantir le fonctionnement correct de la liaison multiterminale en CC.

Cette solution n'est évidemment pas optimale ni du point de vue technique ni économique et, surtout, environnemental.

---

<sup>2</sup> ESCR : Extended Short Circuit Ratio

### 2.3 Solution en CC enterrée jusqu'à Bescano' avec conversion du type VSC

Une alternative qui permettrait de résoudre l'inconvénient d'avoir un réseau actif et avec un niveau de court circuit suffisamment fort en correspondance de tous les terminaux, notamment les terminaux intermédiaires, pourrait consister dans l'adoption de systèmes de conversion de type VSC (Voltage Source Converters).

Les systèmes basés sur les VSC peuvent être utilisés même pour alimenter des réseaux « passifs », c'est-à-dire sans une alimentation déjà préexistante et, en outre, grâce au système de contrôle des composants électroniques IGBT, peuvent filtrer les dissymétries générées par l'absorption déséquilibrée de puissance du TGV.

En réalité, malgré ces considérables avantages, l'alternative en CC à VSC présente des inconvénients; en particulier :

- *capacités*: jusqu'à présent elles sont limitées à 350 MW, même si des solutions jusqu'à 1100 MW sont proposées par les constructeurs. Pour pouvoir satisfaire les conditions de sécurité N-1 il faudrait donc prévoir trois liaisons en CC à VSC de puissance de 1000 MW (solution proposée par les constructeurs mais jamais réalisée) avec des surcoûts très importants aussi bien qu'un impact double sur le territoire. Dans le cas de l'emploi de la technologie plus consolidée avec des liaisons de taille 350 MW, il faudrait installer au moins 5 liaisons avec des surcoûts et un impact sur le territoire encore plus importants;
- *pertes*: 3÷4 fois plus élevées que dans le cas de solution à thyristors comme indiqué dans le cahier n° 6 « *Comparaison des solutions en courant continu enfouies terrestres ou mixtes (terrestre et sous-marine)* »;
- *solution multiterminale*: les solutions multiterminales à VSC, bien que possibles du point de vue théorique n'ont pas encore été adoptées jusqu'à présent. De plus, dans notre cas spécifique il faut garantir la continuité de l'alimentation du TGV même face à un défaut dans la liaison CC à VSC à laquelle le poste de Sta Llogaia est connecté. Pour ce faire, il est nécessaire de prévoir de déclencher automatiquement le tronçon en CC affecté par un défaut et garantir l'alimentation du poste de conversion de l'autre côté. Une procédure similaire doit être prévue aussi pour le poste de Ramis.

De plus, dans le cas de défaut dans le pont de conversion le convertisseur tout entier est mis hors service ; en d'autres termes, la liaison en CC à VSC est assimilable à une liaison en CC à thyristor bipolaire « rigide ». En revanche, les solutions bipolaires avec conducteur de neutre peuvent être gérées même en présence de défaut dans un pont convertisseur avec fonctionnement à moitié de la puissance nominale.

De toute façon, la faisabilité réelle de l'exploitation fiable et sûre de ces schémas de connexion multiterminale à VSC doit faire l'objet d'études spécifiques en s'agissant de solutions jamais adoptées jusqu'à présent.

### 3 CONSIDERATIONS FINALES

Dans le chapitre 2 on a vu qu'une possible extension de la solution enterrée au sud de Sta. Llogaia présente des complexités techniques très remarquables au-delà des coûts d'investissement très élevés et de l'impact environnemental qui risque d'être significatif.

En particulier, les inconvénients suivants ont été mis en évidence :

- *solution en CA* : l'installation d'au moins trois tricâbles à 400 kV et la compensation de puissance réactive associée (environ 1350 Mvar ou 1800 Mvar dans le cas de quatre tricâbles ) présente un impact environnemental remarquable au-delà des coûts très élevés. D'autres problèmes sont liés à la difficulté d'exploitation et à l'impact des câbles sur la qualité de la fourniture. Des aspects additionnels à considérer concernent :
  - o la nécessité de garantir le niveau minimum de court circuit même face au défaut d'un tri-câble (pendant une période très longue : 1 mois);
  - o la nécessité de construire d'importants ouvrages de compensation de la puissance réactive générée par les câbles ;
  - o la grande complexité de coupler une liaison enfouie en CC avec une liaison enfouie en CA.
  
- *solution en CC à thyristors*: nécessité de réaliser un schéma multiterminal pour la fourniture de l'alimentation dans les postes intermédiaires de Sta Llogaia et Ramis ; complexité pour la coordination des systèmes de contrôle associés aux convertisseurs ; nécessité de garantir un niveau minimum de puissance de court circuit à Sta Llogaia et à Ramis pour la stabilité de la tension et, dans le poste de Sta Llogaia, pour ne pas dépasser le seuil de dissymétrie de la tension causée par l'absorption déséquilibrée du TGV ;
  
- *solution en CC à VSC*: les complexités associées à un schéma multiterminal sont similaires à celles de la solution en CC à thyristors. De plus, jusqu'à présent aucune liaison multiterminale en CC à VSC n'a été réalisée. Cette solution présente l'avantage de ne pas requérir un niveau minimum de puissance de court circuit dans les postes de conversions et le système de contrôle peut être dimensionné pour filtrer les dissymétries générées par l'absorption du TGV. Cependant, cette solution présente d'autres inconvénients importants parmi lesquels les plus remarquables sont les suivants :
  - o capacités: jusqu'à présent la capacité maximale de liaison à VSC a été de 350 MW. Les constructeurs ont récemment proposé des solutions à 1100 MW, mais qui n'ont été jamais réalisées jusqu'à présent. De toute façon il serait nécessaire d'envisager au moins trois liaisons en CC à VSC avec un impact négatif sur l'environnement et des surcoûts très importants;
  - o pertes : les pertes sont 3÷4 fois plus élevées que dans le cas de solution à thyristors, avec un impact conséquent sur la réduction d'énergie échangée entre les deux pays.

Au-delà des aspects techniques, le cadre réglementaire est aussi à considérer. En particulier, il est à remarquer que la philosophie adoptée par le Gestionnaire de Réseau Espagnol consiste dans l'élimination des lignes ayant plus de deux terminaux avec l'objectif de ne pas réduire la fiabilité du réseau de transport. Actuellement il y a encore quelques lignes en CA de ce type au niveau de 220 kV. Cependant, dans le Plan de Développement de Réseau 2008-2016 il est prévu que ces lignes à plusieurs terminaux seront progressivement éliminées.



De plus, le Bulletin Officiel d'État publié le 1<sup>er</sup> mars 2005 affirme que des nouvelles lignes multi-terminales ne sont pas admises. Pour cette raison une interconnexion en CC à quatre terminaux n'est pas acceptable étant contre le règlement espagnol.

En général, toutes les alternatives sus-mentionnées présentent des difficultés techniques remarquables de projet, de réalisation et d'exploitation. Ces alternatives constitueraient des «premières mondiales» dont la fiabilité est difficilement évaluable. Des études dédiées seraient nécessaires pour le « design » des systèmes de contrôle dans les convertisseurs surtout dans le cas de solutions en CC multiterminaux.

Suite aux analyses des différentes alternatives, la solution de réaliser le tronçon Bescano-Sta Llogaia en ligne aérienne à 400 kV semble être la plus intéressante du point de vue technique.