

Ligne Jonquières-Fos/mer : résumé de la tierce-expertise

Préambule :

L'étude de tierce-expertise des solutions de renforcement de l'alimentation électrique de la zone industrialo-portuaire de Fos-sur-mer, objet de la présente note, a été réalisée par Monsieur Marc Petit, professeur à CentraleSupélec et directeur du département d'enseignement sur les systèmes d'énergie électrique et membre du laboratoire GeePs, en toute indépendance vis-à-vis de la société RTE.

CentraleSupélec, école d'ingénieur de renommée internationale, a mis en place un vaste réseau de partenariat avec des entreprises pour les activités liées à la formation des ingénieurs et à la recherche. Le secteur de l'énergie électrique est une composante importante des activités de formation et recherche de l'Ecole. A ce titre, la société RTE est un partenaire historique de l'école. RTE soutient (seul ou avec d'autres entreprises) deux chaires de recherche au sein de CentraleSupélec, l'une avec le laboratoire L2S et l'autre avec le laboratoire LGI. Au titre de la formation, RTE est également partenaire d'une mention de 3^{ème} année sur le thème des réseaux d'énergie.

Dans le cadre de ses activités de recherche au sein du laboratoire GeePs, Monsieur Marc Petit n'est pas partie prenante de ces deux chaires de recherche. Dans les dernières années, les activités partenariales entre RTE et le laboratoire GeePs ont porté sur des travaux en lien avec les câbles supraconducteurs (travaux amonts) auxquels il n'a pas pris part, et une étude – sous l'égide de la CRE – sur les coûts de participation des producteurs à des services de réglage de tension. Concernant l'enseignement, le partenariat entre RTE et CentraleSupélec permet à RTE de mieux se faire connaître auprès des élèves, et de proposer des projets aux étudiants dans le cadre de leur cursus de formation. Monsieur Marc Petit est co-responsable de la mention précédemment citée, mais sans que ce partenariat avec RTE n'induisse de relation de dépendance vis-à-vis de RTE.

Enfin, dans le cadre de la présente étude, CentraleSupélec assure n'avoir exercé aucune pression, ni d'ingérence dans les travaux que Monsieur Marc Petit a menés en toute indépendance et neutralité, et dans la plus grande confidentialité tel que demandé par la DREAL.

Synthèse de l'étude de tierce-expertise :

L'alimentation électrique de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur présente une faiblesse structurelle avec un réseau de transport d'électricité 400 kV organisé en antenne depuis le poste de Tavel, et à ce jour l'existence de deux axes, l'un au nord entre Tavel et Boutre, et l'autre au sud entre Tavel et Broc-Carros (région de Nice) via le poste de Réaltor (zone de Marseille). Pour cette dernière zone, RTE a reçu de nombreuses demandes de raccordement (réindustrialisation,

électrification de l'industrie, centres de données, ...) qui l'amènent à devoir être en mesure de répondre à des besoins supplémentaires de puissance estimés de manière « raisonnable » selon RTE à 3700 MW à l'horizon 2028 (3000 MW vers la zone industrialo-portuaire (ZIP) de Fos/mer Fos et 700 MW vers Marseille), soit près de deux fois moins que les demandes de raccordements reçues par RTE et Enedis.

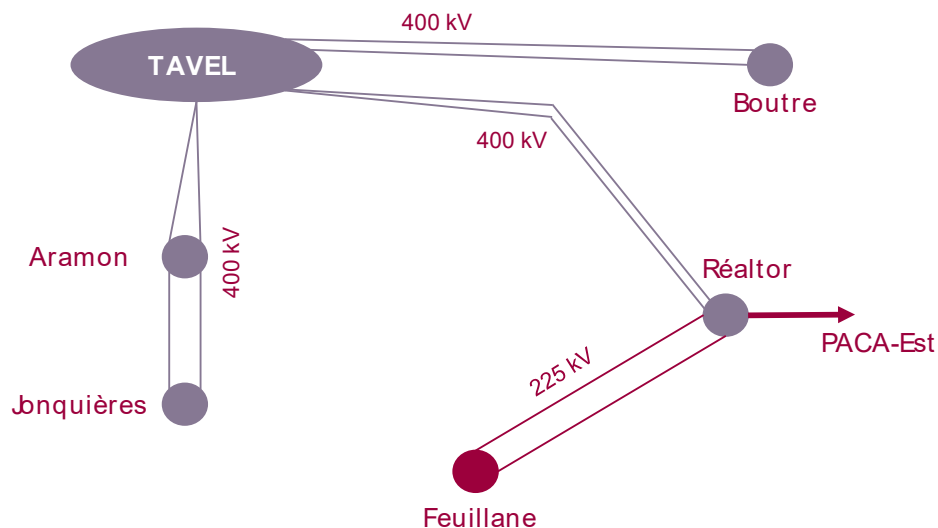


Fig. 1 : Schéma simplifié du réseau de transport d'électricité actuel

C'est pourquoi le réseau électrique a besoin d'être renforcé via plusieurs solutions techniques :

- Renforcer l'axe Tavel-Réaltor pour sécuriser l'alimentation afin de faire face à l'augmentation de la demande et à une perte d'ouvrage lors d'un incident ;
- Renforcer la capacité d'alimentation de la zone de Fos/mer actuellement alimentée par le réseau 225 kV Réaltor-Ponteau-Feuillane qui ne permet pas de faire face à la croissance attendue ;
- Créer un nouvel axe pour renforcer et sécuriser l'alimentation de la zone de Fos/mer (redondance via un bouclage).

Avant d'examiner les solutions à étudier dans le cadre de la présente tierce-expertise, le rapport rappelle plusieurs principes fondamentaux de dimensionnement des réseaux électriques. C'est en effet notamment en fonction de la répartition des transits de puissance (qui vont s'opérer dans un réseau de transport d'électricité en fonction des soutirages attendus aux différents postes électriques, et des caractéristiques physiques des lignes) et de la nécessaire robustesse de celui-ci en cas de pertes d'ouvrage (situation N-1) qu'un réseau de transport doit être dimensionné.

Il est possible de résumer les points clés suivants :

- Un réseau maillé (ou à minima bouclé) apporte une meilleure sécurisation de l'alimentation qu'un réseau radial (réseau 400 kV de type antenne depuis Tavel, situation actuelle) ;
- La limite d'échauffement d'un ouvrage (à cause des pertes) fixe sa capacité limite de transit qui va aussi dépendre de la température ambiante (d'où des distinctions saisonnières) ;
- Une liaison aérienne est plus fiable (moins d'occurrences de défauts qui pourraient conduire à des interruptions longues), moins coûteuse, et elle peut être assez facilement dimensionnée pour une capacité de transit importante ;
- Dans un réseau maillé ou bouclé en courant alternatif, il n'y a pas de contrôle direct des flux de puissance qui transitent sur une ligne, à moins d'installer des équipements spécifiques. Ce sont les caractéristiques physiques de la ligne et des lignes environnantes qui fixent le flux. Cela peut se répercuter sur le dimensionnement de cette ligne. De plus, il ne faut pas confondre la capacité de transit d'une ligne et le flux qui va réellement transiter à un moment donné.

Les 2 renforcements de lignes existantes mentionnés précédemment sont des opérations en cours ou sont prévus d'être réalisés à court terme par RTE :

- En ce qui concerne spécifiquement l'axe Tavel-Réaltor, RTE prévoit deux actions : (i) la création d'un poste 400 kV à Roquerousse qui permettra de mieux sécuriser la partie amont de cet axe, et (ii) un changement de conducteurs entre Roquerousse et Réaltor pour augmenter la capacité de transit, mais cette partie restera dans certaines situations un point de faiblesse de l'alimentation régionale, et la programmation des travaux reste un sujet délicat compte-tenu du caractère stratégique de cette partie du réseau qui rend très difficile la consignation pour travaux ;
- Pour augmenter la capacité d'accueil sur la ZIP, RTE renforce actuellement l'axe Réaltor-Ponteau-Feuillane pour une exploitation en 400 kV (l'axe a été initialement construit pour supporter ce niveau de tension) alors qu'il n'est exploité aujourd'hui qu'à la tension 225 kV.

La création d'un nouvel axe pose quant à elle deux questions : (i) quelle solution technologique choisir ? (une liaison aérienne ? une liaison souterraine ? une liaison mixte ? une liaison en courant alternatif ou courant continu ?), et (ii) quel dimensionnement en fonction des flux de puissances à faire transiter et des solutions technologiques ? Dimensionnement et choix technologique sont liés, avec des impacts forts en termes de coûts, délais et complexité de réalisation.

RTE propose de construire une ligne aérienne permettant le transit d'une forte puissance (4400 MW) en courant alternatif à 400 kV entre les postes de Jonquières et Feuillane. Cet axe permettrait aussi de boucler le réseau 400 kV pour sécuriser l'alimentation de la ZIP et de la région. Au vu de la structure particulière du réseau entre Tavel et la ZIP de Fos (dans la situation projetée deux « chemins » possibles : Tavel-Jonquières-Feuillane et Tavel-Réaltor-Feuillane), le transit de puissance modélisé pour alimenter la ZIP, évalué à 4400 MW par RTE ne circule que marginalement (environ 10 % du besoin) via sur l'axe Réaltor-Feuillane, ce qui conduit à un besoin de dimensionnement important de l'axe Jonquières-Feuillane. Cette spécificité impose d'ailleurs de renforcer la partie entre Tavel et Aramon. Seule l'utilisation d'équipements de contrôle des flux permettrait de mieux exploiter la capacité existante de l'axe Réaltor-Feuillane

(pour créer un « rééquilibrage »), et ainsi de réduire le dimensionnement du nouvel axe.

En dehors de tout impact paysager et avifaune, la solution aérienne proposée par RTE serait celle à retenir compte-tenu de ses avantages techniques indiscutables en termes de délai de mise en œuvre, coût (300 à 400 M€) et disponibilité. Cette solution aérienne permet de facilement obtenir un dimensionnement de forte puissance.

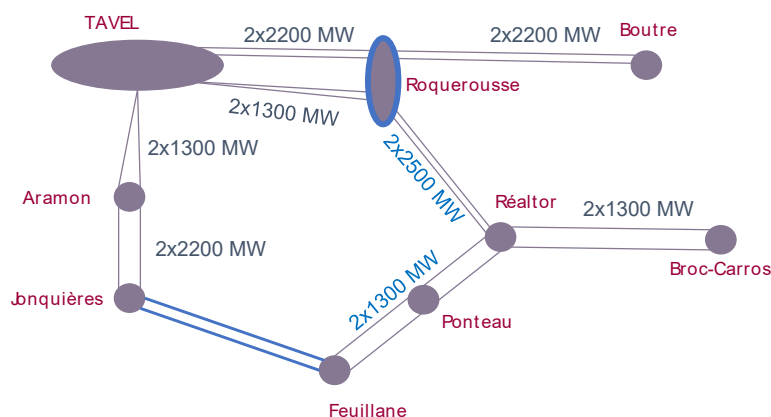
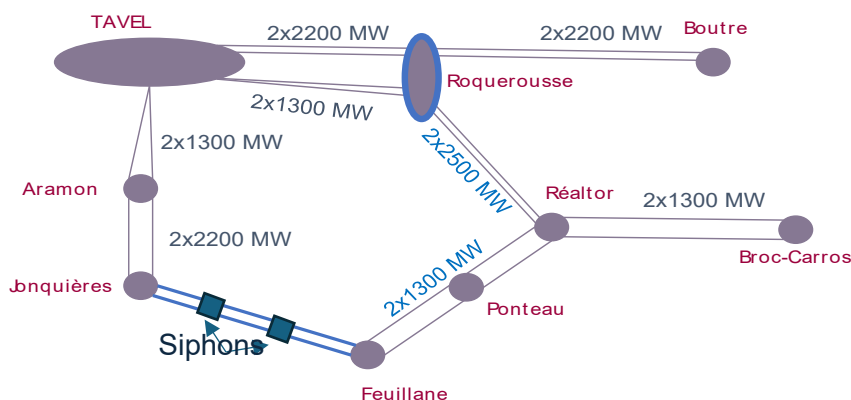


Fig. 2 : Schéma simplifié de la solution proposée par RTE

Le rapport se penche également sur une **solution avec enfouissement partiel (siphons)** de l'axe entre Jonquières et Feuillane. Plusieurs projets de ce type ont été réalisés en Europe ces dernières années. Parmi les verrous à lever, il faut citer l'identification de la localisation des siphons, le calcul du nombre de câbles souterrains à utiliser (très dépendant du choix de dimensionnement, 4400 MW ici), la construction de postes électriques intermédiaires, et la recherche de corridors de largeurs suffisantes pour mener les travaux. Enfin, l'estimation des coûts (500 à 900 M€ selon les cas) montre que le surcoût n'est pas démesuré par rapport à la solution proposée par RTE.



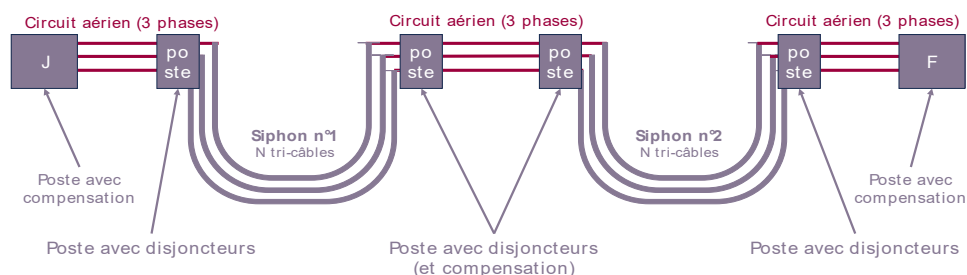


Fig. 3 : Schéma simplifié de la solution avec enfouissement partiel

Le rapport analyse également une alternative qui consisterait à **doubler l'axe Tavel-Réaltor-Feuillane** en remplacement de l'axe Jonquières-Feuillane proposé par RTE. Cette solution obligerait de déposer la ligne actuelle pour la création de la nouvelle et surtout augmenterait la fragilité du réseau en cas de perte d'ouvrage (règle d'exploitation européenne).

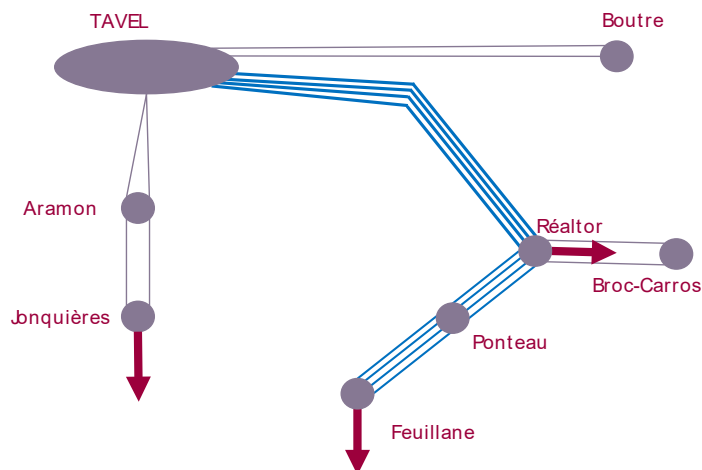


Fig. 4 : Schéma simplifié de la solution de doublement de la ligne Tavel – Réaltor – Feuillane

Face à la solution proposée par RTE, le **collectif THT 13/30** propose une **solution en courant continu haute tension**. Le rapport explique dans quelles situations l'utilisation d'une telle technologie est indispensable. A ce jour c'est principalement pour des liaisons sous-marines, par exemple en mer du nord, pour renforcer les liens électriques entre pays. Mais cela commence à être davantage utilisé pour des liaisons terrestres souterraines de forte puissance lorsque la construction d'une liaison aérienne n'est pas possible. En s'appuyant sur des données publiques, il apparaît que la disponibilité de ces infrastructures hautement complexes est plus faible que celle d'une liaison aérienne. Enfin, dans la période actuelle, il y a de grosses tensions d'approvisionnement puisque les carnets de commande des équipementiers sont pleins pour au moins les cinq prochaines années.

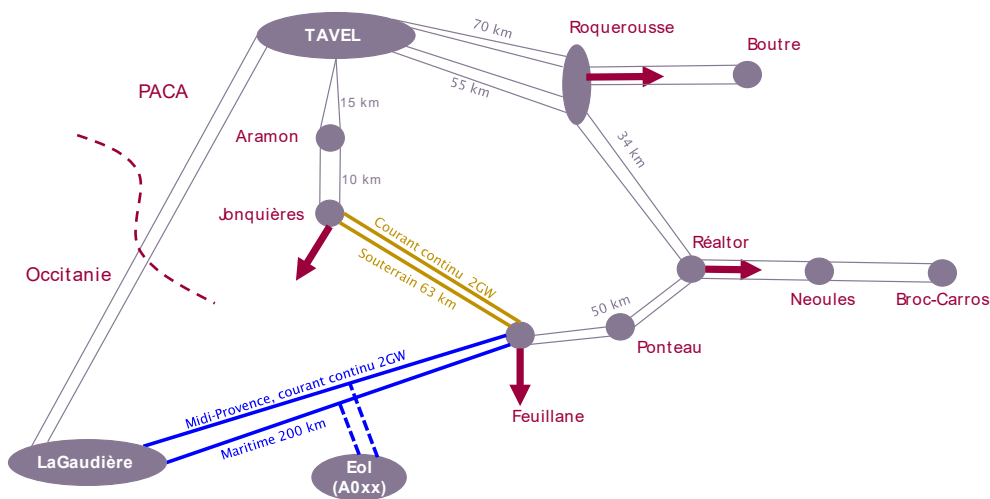


Fig. 5 : Schéma simplifié de la solution proposée par le collectif THT 13/30

La solution portée par le collectif THT 13/30 s'appuie sur deux tronçons de liaison à courant continu de 2GW chacun pour conserver une capacité additionnelle d'apport de 4 GW sur le poste de Feuillane : (i) un tronçon souterrain de 2 GW entre Jonquières et Feuillane, et (ii) une reprise de l'ancien projet de ligne sous-marine Midi-Provence en le portant à 2 GW et en le modifiant pour permettre la collecte des futurs parcs éolien en mer dans l'esprit de ce qui est envisagé sur la côte atlantique (projet GiLA, coût estimé de 4 Md€).

La proposition du collectif THT 13/30 a une pertinence technique en cherchant à mutualiser plusieurs projets d'infrastructure au-delà de la seule zone de Fos/mer : le raccordement éolien offshore et éventuellement la levée de contraintes sur le réseau 400 kV entre Tavel et l'Occitanie. Par ailleurs, cette solution apporte un meilleur maillage de la ZIP avec trois voies d'accès (depuis Jonquières, depuis Réaltor, et depuis la mer), et permettrait de mieux exploiter la capacité constructive de l'axe Réaltor-Feuillane (par rapport à une solution en courant alternatif sans dispositifs de réglage des flux).

Mais quatre difficultés sont à mentionner sur ce projet en courant continu : (i) la définition précise de la solution technique pour le tronçon Midi-Provence car il y a très peu d'exemples dans le monde, (ii) un problème de calendrier qui nécessiterait à organiser le projet en plusieurs phases pour ne pas trop retarder le renforcement de l'alimentation de la zone de Fos/mer, (iii) les délais pour la disponibilité des équipements, et (iv) un coût très important (au moins 1,5 Md€ pour le tronçon entre Jonquières et Feuillane, et plus de 3 Md€ pour le second tronçon).

Concernant l'enfouissement sur la partie terrestre, une solution à courant continu permet de poser moins de câbles qu'une solution en courant alternatif, mais dans les deux cas cela nécessite de disposer d'un corridor de travail de largeur suffisante.

Pour conclure, les solutions évaluées ont été comparées (tableau ci-après) selon plusieurs critères dont les principaux sont les coûts, les délais et la fiabilité (disponibilité).

Tableau comparatif des solutions (rouge = faible, orange = moyen, jaune = bon, et vert = très bon)

Critères	400 kV aérien (J-F)	400 kV aérien avec siphons	400 kV aérien (double ^t T-Réaltor)	THT 13/30 (deux liaisons en courant continu)
Coût	Solution de moindre coût (300 à 400 M€)	Des coûts supplémentaires mais sans excès (500 à 900 M€)		Très élevé (mais un apport plus large) (> 4 Md€)
Délais de mise en œuvre	Rapide après validation	Beaucoup plus long (>2,5 à 5 ans). Tensions sur les usines de production de câbles	Très long	Très longs. Réalisation études détaillées (2 ans) + 5 ans pour la réception des équipements + installation et tests (2 ans)
Fiabilité (disponibilité)	- Très forte. - Très peu de maintenance - Très peu de défauts avec réparation longue (indisponibilité totale ou partielle < 1j/an)	- Moindre sur la partie souterraine, - Indisponibilité plus longue. - Durées de réparation longues (indisponibilité totale ou partielle : 5 à 20j/an)	- Risque de consignation sur incendie avec perte de tous les circuits - Non compatible avec les règles de sûreté du système électrique européen	- Ouvrages complexes qui nécessitent des maintenances régulières. - Indisponibilité longue sur incident (indisponibilité totale ou partielle ~20j/an)
Maillage du réseau	Bouclage	Bouclage	Non. Risque par rapport aux règles de sûreté	Oui
Pilotage des flux	Faible	Faible	Faible	Réalisable via les convertisseurs
Mutualisation des invest.	Non	Non	Non	Possible
Facilité de réalisation	Pas de difficulté apparente	- Plus complexe (jonctions, postes intermédiaires) - Enfouissement : chantier lourd	Complexe car impossibilité de démonter la ligne existante	Complexe mais RTE gagne en maîtrise, corridors pour travaux terrestres
				Très complexe pour la partie en mer avec configuration multi-terminaux