

Audit des alternatives à la réalisation d'une ligne à très haute tension entre le Cotentin et le Maine



Bruno Cova - Michele de Nigris

CESI spa – Milan (Italie)

Sommaire

- Le problème examiné
- Impact centrale de production – réseau
- La méthode appliquée

- Les alternatives examinées
- Les résultats

- **Considérations finales**
- **Réponses à vos questions**

Le problème examiné (1/2)

Contexte:

- **Octobre 2004:** EDF annonçait son intention de construire sur le site de la centrale nucléaire de Flamanville (Manche), déjà équipée de 2 groupes de 1300MW chacun, un troisième groupe de production d'électricité (EPR 3) d'une puissance d'environ 1600 MW
- **2012:** date prévue pour la mise en service



Problème:

- comment acheminer la puissance additionnelle vers les centres de charge?



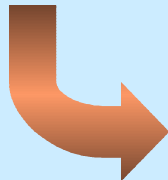
Le problème examiné (2/2)

Recherche d'une solution:

- **2005:** Les études réalisées par RTE montrent que pour garantir en permanence la sûreté de fonctionnement du système électrique français lors de la mise en service de Flamanville 3, il est nécessaire de construire une nouvelle ligne à 400.000 V d'une longueur d'environ 150 km

Projet "Cotentin-Maine"

- **Nov. 2005:** la CNDP, à la demande de la CPDP, requiert l'exécution d'une expertise indépendante pour étudier la faisabilité des différentes solutions alternatives



- **Déc. 2005-févr. 2006:** l'exécution de l'audit est attribuée au cabinet d'études CESI de Milan

Impact centrale de production – réseau

Écoulement de charge

Niveau de court circuit

Stabilité face aux grandes perturbations

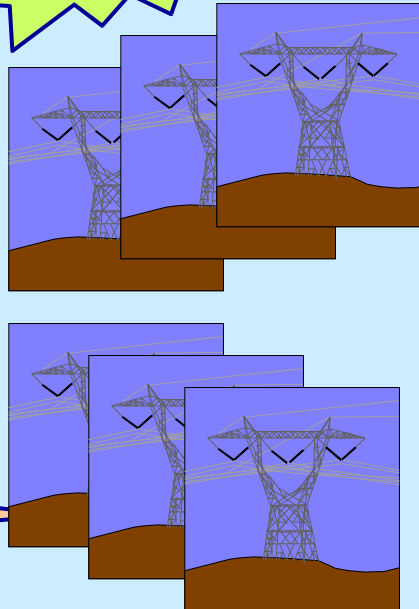
Stabilité face aux petites perturbations

Stabilité de la fréquence



Études spécifiques dans le cas de solutions non conventionnelles

- automates
- courant continu
- dispositifs FACTS
- compensation série, etc.....



La méthode appliquée

Examen des problèmes posés par l'entrée en service du nouveau groupe de Flamanville 3

Analyse des études exécutées par RTE

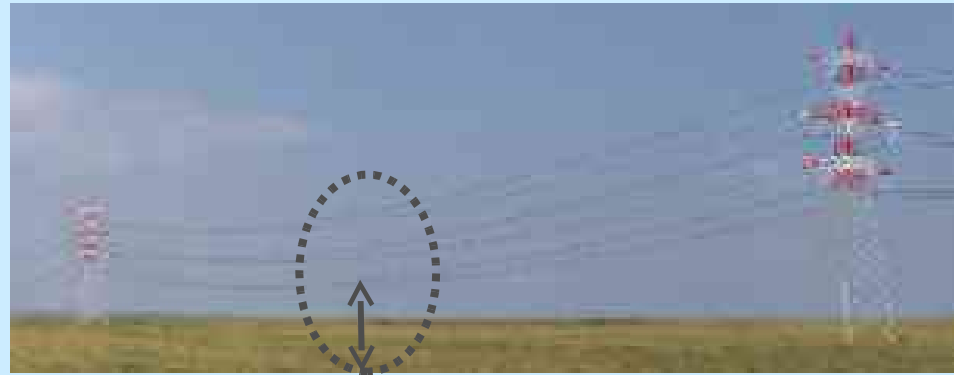


Exécution de simulations numériques par CESI en utilisant un progiciel développé par CESI même

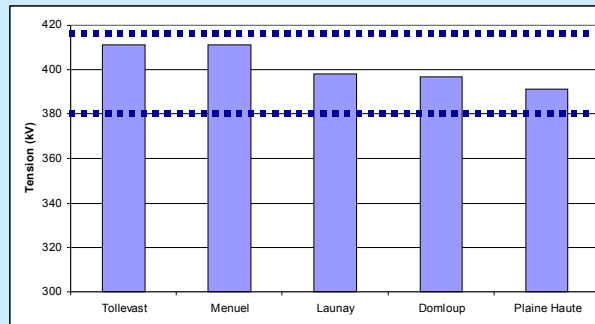
Indication de la direction la plus favorable pour l'acheminement de la puissance et des solutions techniquement pertinentes

Les principaux problèmes posés par Flamanville 3

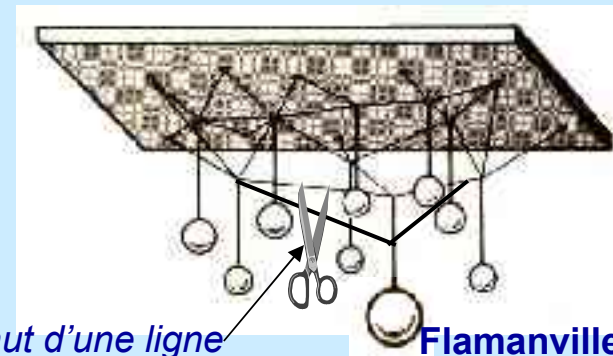
➤ Écoulement de charge: charge des lignes THT de transport



➤ Profil de tension



➤ Stabilité des groupes face aux grandes perturbations: lien synchronisant



Les alternatives examinées

Première alternative: rien du tout

Pas de renforcements

Non



- Lien synchronisant pas suffisamment fort
- Légère surcharge en condition normale
- En cas de défaut d'une ligne => écroulement de tension, notamment en Bretagne, et surcharges inacceptables

Il faut donc renforcer quelque part le système

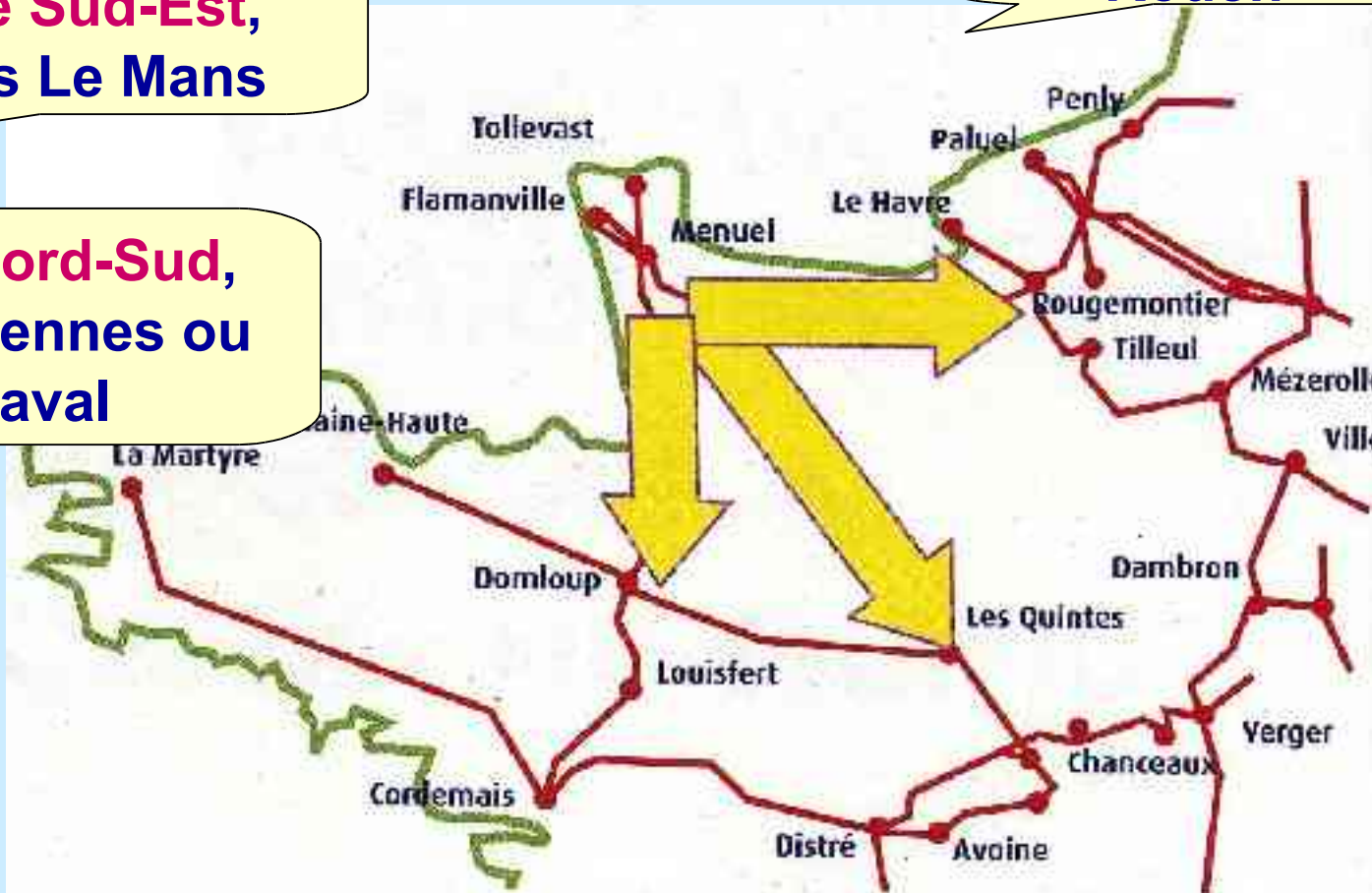
La direction la plus favorable

Trois possibles parcours terrestres

Axe Sud-Est,
vers Le Mans

Axe Est, vers
Rouen

Axe Nord-Sud,
vers Rennes ou
Laval



La direction la plus favorable

Trois possibles parcours terrestres

Axe Est: longueur
 ≈168 km vers le poste
 existant de
 Rougemontier (27)

Axe Sud-Est:
 longueur ≈190 km vers
 le poste existant des
 Quintes (72)

Axe Nord-Sud:
 longueur ≈160 km pour
 aboutir entre Rennes (35)
 et Laval (53)



La direction la plus favorable

Pour le choix de la direction la plus favorable, on a adopté la même solution appliquée aux trois axes



Ligne aérienne à double circuit à 400 kV

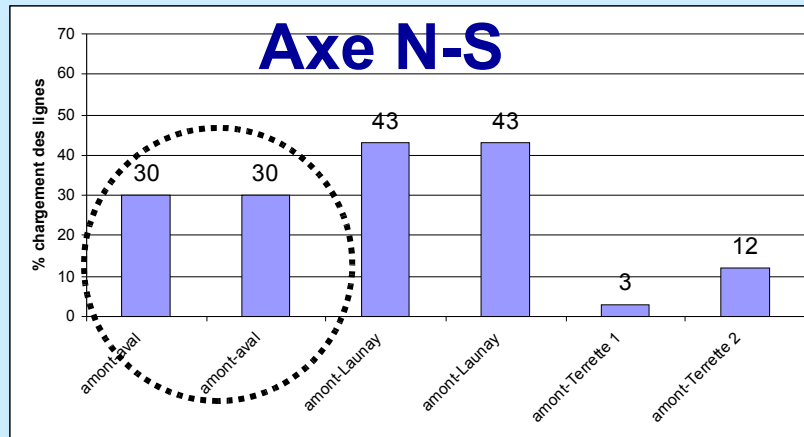
**Capacité en conditions normales:
2515 MVA à 400 kV**

**Capacité en conditions d'urgence:
3170 MVA à 400 kV**



La direction la plus favorable

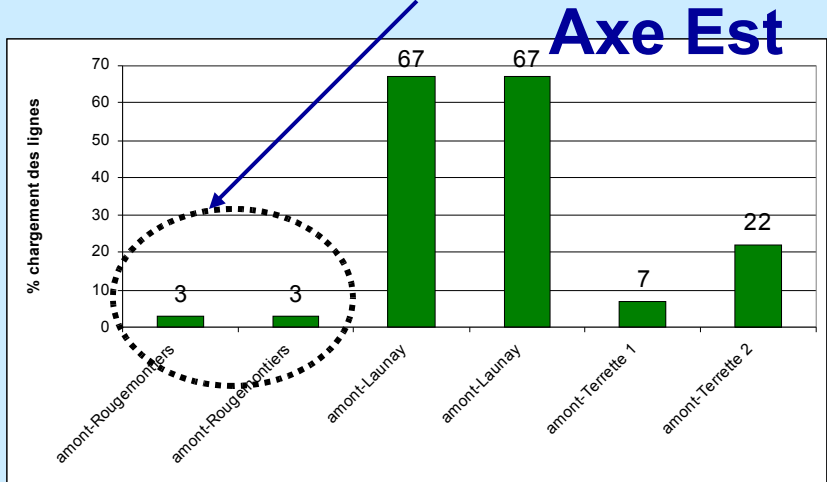
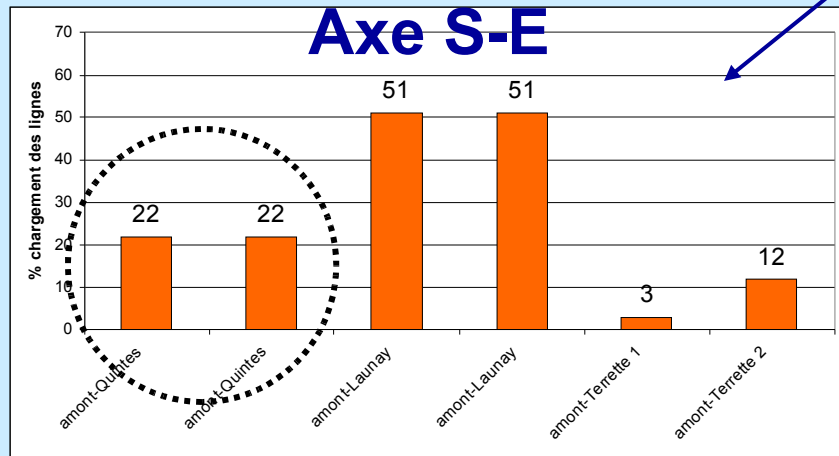
Flux de puissance



Les trois solutions sont efficaces pour la stabilité du système, mais...

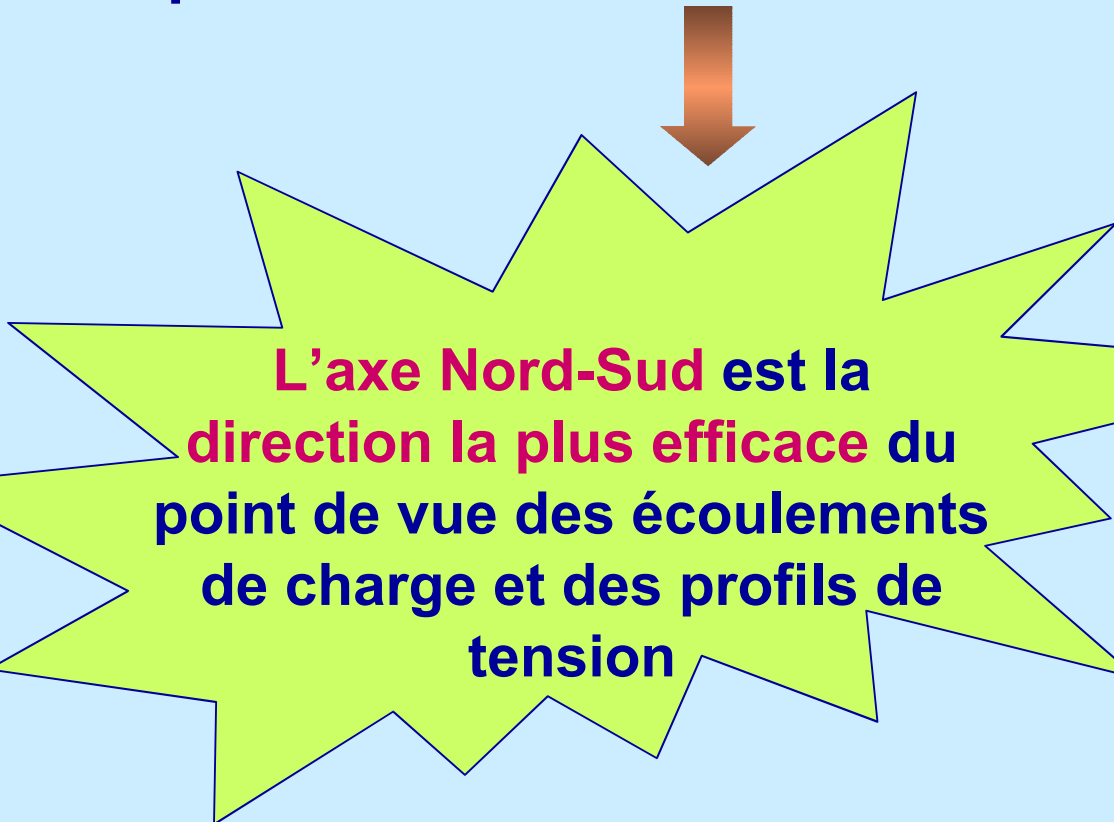
Chargement déséquilibré des lignes

Chargement très réduit de la nouvelle ligne



La direction la plus favorable

... de plus, **l'axe Nord-Sud** est très efficace pour le "soutien" de la tension, notamment dans l'Ouest face aux perturbations



L'axe Nord-Sud est la **direction la plus efficace** du point de vue des écoulements de charge et des profils de tension



Solutions terrestres aériennes:



➤ Ligne aérienne additionnelle à double circuit à 400 kV

➤ Ligne aérienne additionnelle à simple circuit à 400 kV

➤ Reconstruction en quadruple circuit THT 400 kV de la ligne Manuel-Launay-Domloup

➤ Ligne en courant continu en parallèle à la ligne 400 kV Manuel-Domloup existante

➤ Ligne aérienne en courant continu en utilisant la ligne à double circuit 400 kV Manuel-Domloup existante actuellement en courant alternatif

Solutions terrestres en câble:

- **Câble à isolation synthétique (CIS ou XLPE)**



- **Câble à isolation gazeuse (CIG)**



- **Ligne mixte : câble + ligne aérienne en deux hypothèses de longueur de câble, 20% et 40% (environ 30 km et 60 km) de la longueur totale de la ligne (environ 150 km)**

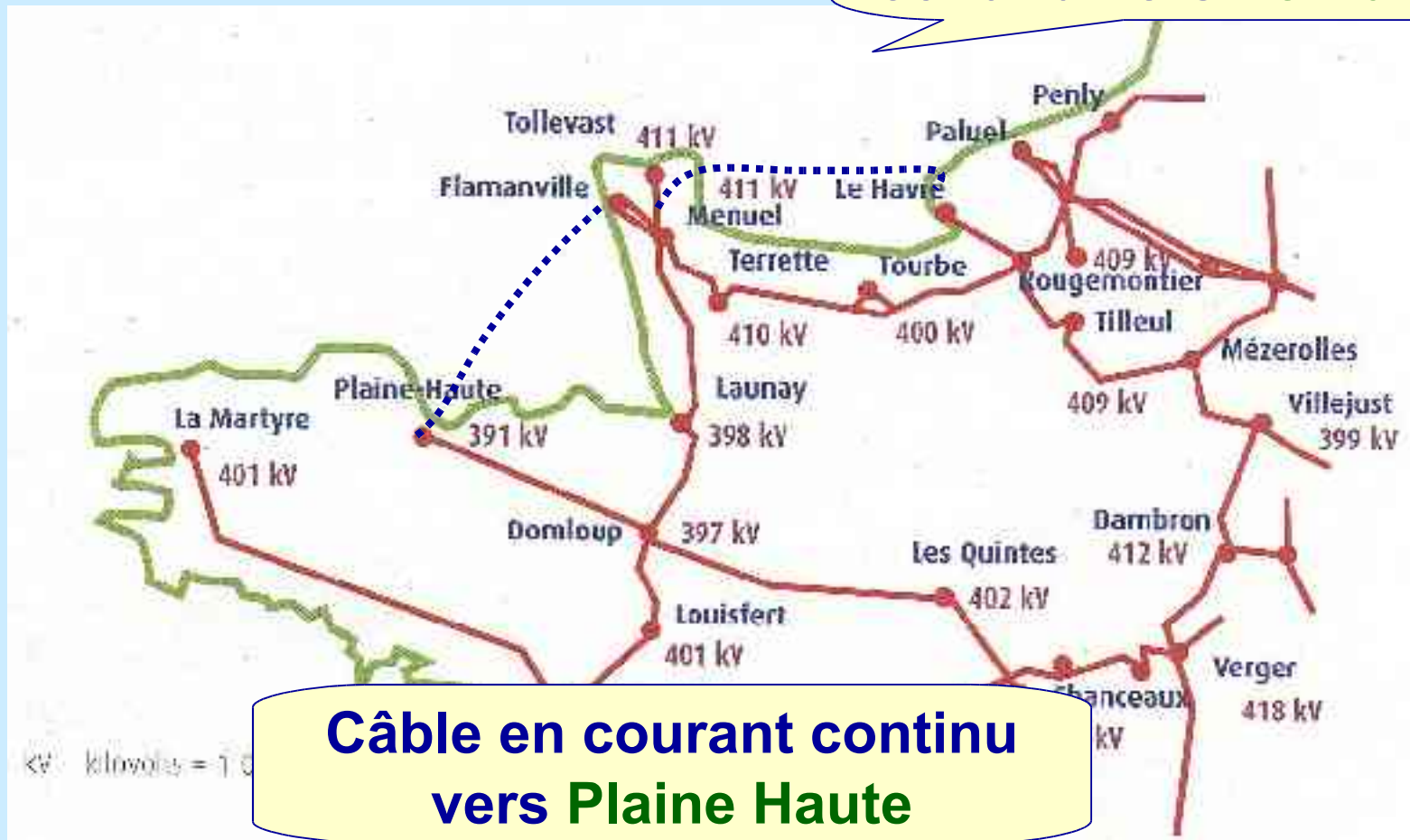
Solutions terrestres non conventionnelles:

- **Compensation série à Rougemontier d'environ 50% de la réactance des lignes vers Terrette et Tourbe plus une nouvelle ligne aérienne à simple circuit sur l'axe nord-sud.**
- **Compensation série à Rougemontier d'environ 50% de la réactance des lignes vers Terrette et Tourbe plus une ligne aérienne HVDC en courant continu de Manuel à Domloup.**



....et pourquoi pas la mer ?

Câble en courant continu
vers **Le Havre**



Ligne aérienne additionnelle à simple circuit à 400 kV

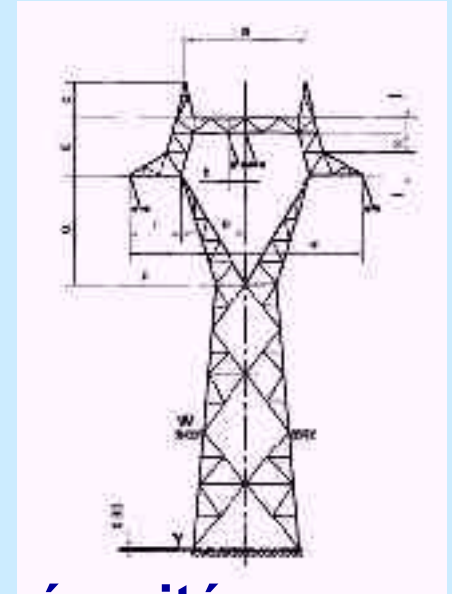
Oui

En conditions normales, contraintes de réseaux satisfaites

Non

Cette solution ne garantit pas les conditions de sécurité face aux perturbations:

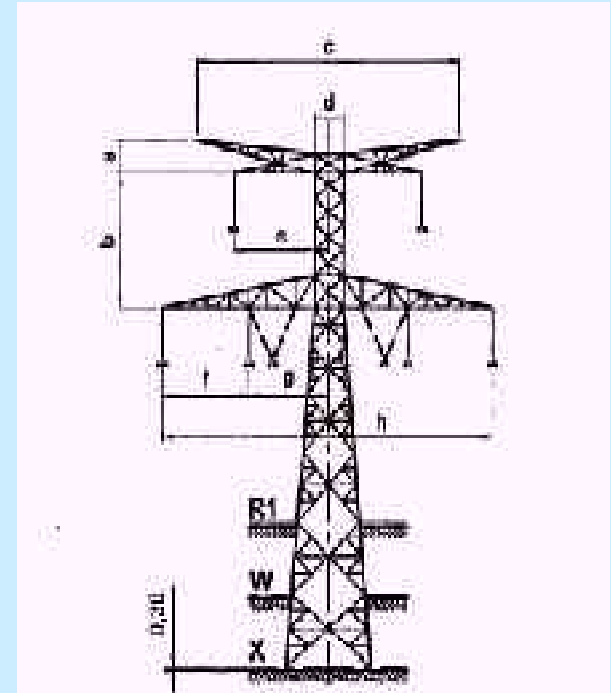
- **lien synchronisant à la limite** (*pas de souplesse pour réglage de tension, l'accueil de production éolienne...*)
- **faible tenue de tension en Bretagne**
- **légère surcharge dans un poste de transformation**



Ligne aérienne additionnelle à double circuit à 400 kV

Oui

- En conditions normales, contraintes de réseaux satisfaites
- En condition d'urgence, bonne tenue de tension et pas de surcharges intolérables
- Lien synchronisant suffisant
- Chargement des lignes bien équilibré

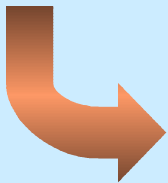


Reconstruction en quadruple circuit THT 400 kV de la ligne Manuel-Launay-Domloup



Oui

- En conditions normales, contraintes de réseaux satisfaites
- En condition d'urgence, bonne tenue de tension et pas de surcharges intolérables
- Lien synchronisant suffisant
- Chargement des lignes bien équilibré



du point de vue “exploitation réseau” cette solution offre les mêmes performances de la ligne double terre sur l'axe Nord-Sud

Ligne en courant continu en parallèle à la ligne 400 kV Mensual-Domloup existante



Oui

- Ecoulement de puissance
- Tenue de tension



Non

- Pas de lien synchronisant suffisant !

Ligne aérienne en courant continu en utilisant la ligne à double circuit 400 kV Manuel-Domloup existante en courant alternatif



Non

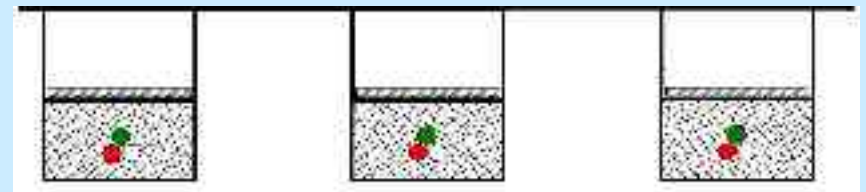
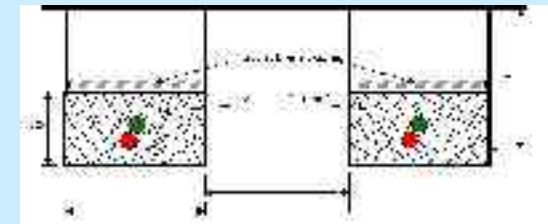
- **Pas de lien synchronisant suffisant !**
- **Nécessité de la mise hors service de la ligne existante pour plusieurs mois pendant la transformation en courant continu**

Câble à isolation synthétique ou sèche (CIS ou XLPE)

a) Simple tricâble – 3 stations intermédiaires

a) Double tricâble – 3 stations intermédiaires

a) Triple tricâble – 3 stations intermédiaires



Toute la liaison enfouie

Pas d'ouvrages similaires au monde !

Solutions en câble – Problème général posé par cette solution:

- Les câbles se comportent comme des énormes condensateurs dont la puissance réactive doit être compensée au moyen de selfs
- Difficulté de contrôle de la tension surtout dans la phase de mise en tension (“énergisation”)

Capacité vers la terre:

câble

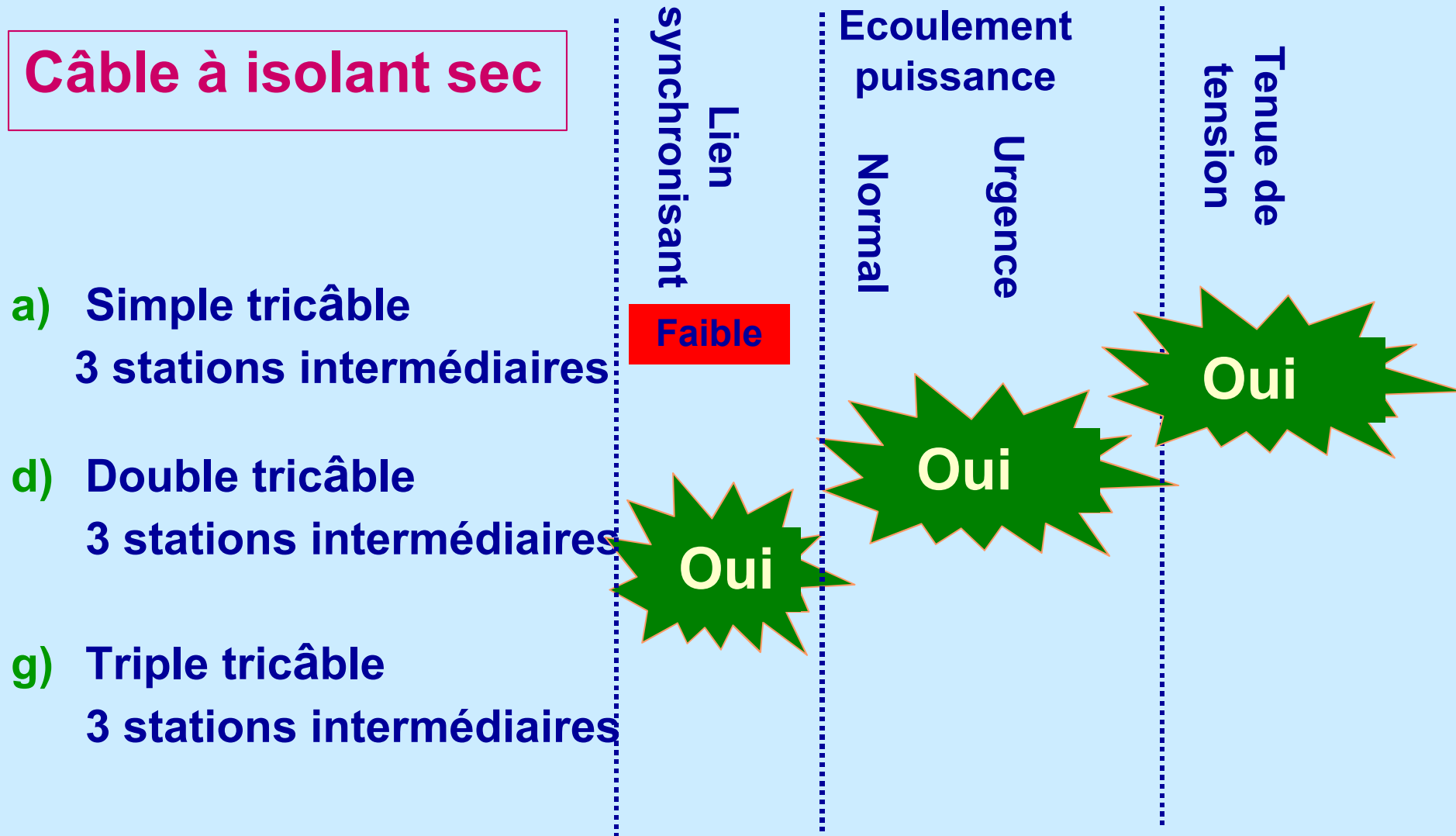
234 nF/km

ligne aérienne

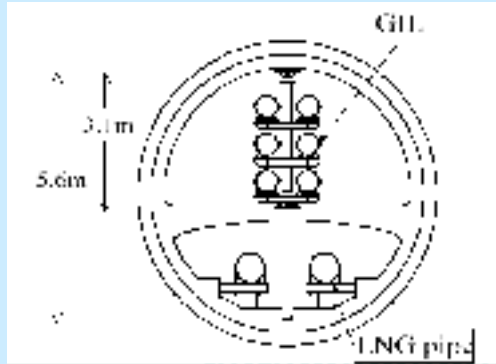
11÷14 nF/km



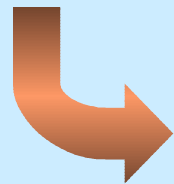
Câble à isolant sec



Câble à isolation gazeuse: deux circuits



Paramètres électriques bien plus favorables que dans le cas de câble à isolant sec



Pas besoin d'ouvrages au milieu du câble pour le contrôle de tension

Câble à isolation gazeuse: deux circuits

Oui

Toutes les contraintes d'exploitation de réseau sont satisfaites tant en conditions normales que d'urgence



Pas d'ouvrages similaires au monde: les ouvrages existants se limitent à quelques centaines de mètres

Ligne mixte: câble + ligne aérienne double circuit en deux hypothèses de longueur de câble:

- b) 30 km (20% de la longueur totale de la ligne)**
- c) 60 km (40% de la longueur totale de la ligne)**

Oui

Toutes les contraintes d'exploitation de réseau sont satisfaites tant en conditions normales que d'urgence



Compensation série à Rougemontier sur les lignes vers Terrette et Tourbe.

Renforcement du réseau avec un ligne aérienne à simple circuit du «poste amont» au «poste aval»



Simple terre
en C.A

Condensateur
série

Oui

...conditions d'exploitation en urgence
à la limite des surcharges acceptables

Compensation série à Rougemontier sur les lignes vers Terrette et Tourbe.

Renforcement du réseau avec une ligne aérienne en courant continu à simple circuit de Manuel à Domloup



Simple terre
en C.C

Condensateur
série

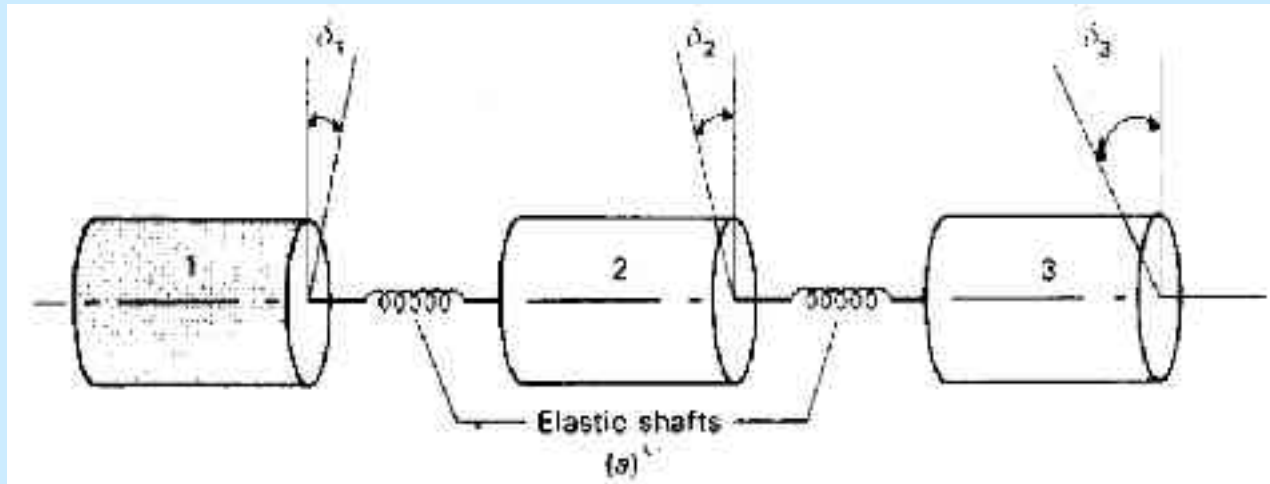
Oui

...conditions d'exploitation en urgence
à la limite des surcharges acceptables

Compensation série à Rougemontier sur les lignes vers Terrette et Tourbe.

Attention !

La présence de compensation série peut causer des phénomènes de résonance hyposynchrones (SSR) sur les axes des turboalternateurs



Solutions sous-marines

Seulement des solutions en CC peuvent être envisagées

Liaison en courant continu vers Le Havre

Câble sous-marin vers Le Havre (≈ 110 km)



Ligne aérienne (≈ 30 km) jusqu'aux alentours de Huberville-la-Mer

Non

- Pas de tenue de tension vers l'Ouest
- Surcharges intolérables face aux perturbations
- La puissance revient partiellement vers Manuel à travers Terrette

Solutions sous-marines

Liaison en courant continu vers Plaine Haute

Ligne Manuel - mer
(≈20 km)

Câble sousmarin
vers Pont Rolland
(≈140 km)



Ligne Pont Rolland –
Plaine Haute (≈20 km)

Non

- Le réseau en Bretagne n'est pas apte à recevoir cette puissance additionnelle
- Niveau de court circuit trop faible
- surcharges intolérables même en conditions normales

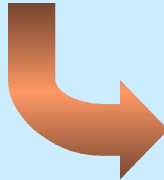
Lignes aériennes terrestres en courant alternatif

Option	Lien synchr.	Ecoulement de puissance		Notes
		N	N-1	
Reseau sans renforcement				
Ligne aerienn simple terre sur axe N-S				Lien synchronisant trop faible . Légère surcharge à Launay
Ligne aerienn double terre sur axe N-S				
Ligne aerienn double terre sur axe N-SE				Prise de charge moins équilibrée mais acceptable
Ligne aerienn double terre sur axe O-E				Prise de charge de la ligne nulle ; mauvais fonctionnement en urgence
Reconstruction ligne Manuel-Domloup en quadruple terre				Inacceptable car il faudrait mettre hors service la ligne Manuel-Domloup

Lignes aériennes terrestres en courant continu

Option	Lien synchr.	Écoul. de puissance	Notes
Connexion CC en parallèle à la ligne existante Manuel Domloup			Lien synchronisant trop faible.
Transformation de la ligne Manuel-Domloup en ligne CC			Lien synchronisant insuffisant. Inacceptable car il faudrait mettre hors service la ligne Manuel-Domloup

Liaisons en courant continu sousmarines



Pas acceptables

Liaisons en câble ou lignes mixtes

Option	Lien synchr.	Ecoul. de puissance	Notes
Câble enterré 1x3x2500 mm ²			Lien synchronisant trop faible. Légère surcharge à Launay
Câble enterré 2x3x2500 mm ²			Acceptable du point de vue du réseau. Problématique la capacité de transport
Câble enterré 3x3x2500 mm ²			Acceptable du point de vue du réseau.
Câble enterré 4x3x2500 mm ²			Acceptable du point de vue du réseau.
Ligne mixte: ligne double terre + câble 2x3x2500 mm ² (30 km)			Acceptable du point de vue du réseau.
Ligne mixte: ligne double terre + câble 2x3x2500 mm ² (60 km)			Acceptable du point de vue du réseau. Risque d'être problématique pour la fiabilité
LIG enterrée 2x3xΦ500 mm			Acceptable du point de vue du réseau.

Note: - câble à isolant sec: nécessité d'ouvrages pour le contrôle de tension;

- pas d'expériences similaires au monde.

Solutions non conventionnelles

Option	Lien synchr.	Ecoulement de puissance		Oscill. méca. turb.-alt	Notes
		N	N-1		
Compensation série sur l'axe O-E					Lien synchronisant suffisant ; s'effondre en conditions d'urgence ; risque d'oscillations mécaniques de l'axe turbine-alternateur et de résonances harmoniques
Compensation série sur l'axe O-E et ligne simple terre sur l'axe N-S					Comportement acceptable du point de vue du réseau. Risques d'oscillations mécaniques de l'axe turbine-alternateur et de résonances harmoniques. Nécessité de réviser les critères de protection des lignes
Compensation série sur l'axe O-E et câble enterré 1x3x2500 mm ² sur l'axe N-S					
Compensation série sur l'axe O-E et CC aérien sur l'axe N-S					