



**APPLICATIONS DES SUPRACONDUCTEURS
DANS LES RESEAUX ELECTRIQUES**

Jean-Maxime SAUGRAIN

**Nexans Corporate Technical Manager, Energy Infrastructure
Nexans Superconductor Activity Manager**

PROSPECTIVE 2100 – Paris – 21 janvier 2009

- Présentation des supraconducteurs
- Câbles supraconducteurs
 - Présentation
 - Principaux projets
 - Applications
- Limiteurs de courant supraconducteurs
- Conclusion

- Présentation des supraconducteurs

- Câbles supraconducteurs
 - Présentation
 - Principaux projets
 - Applications

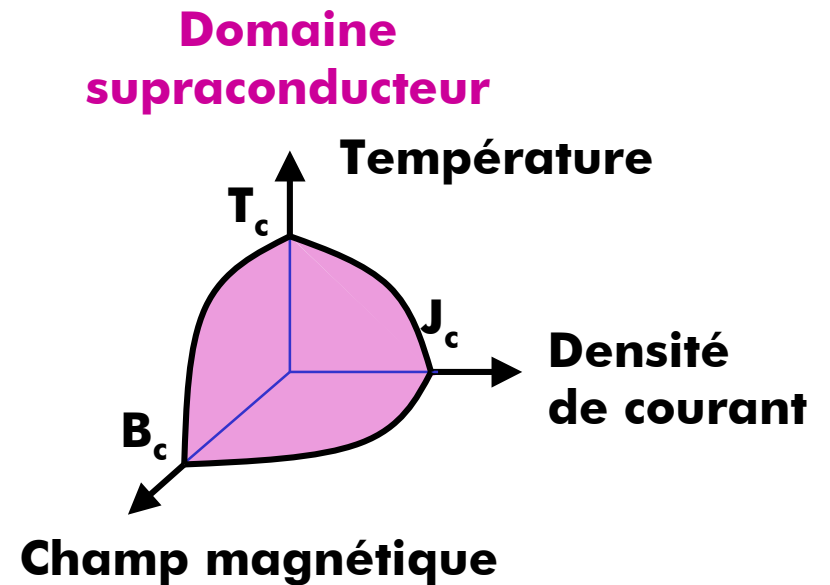
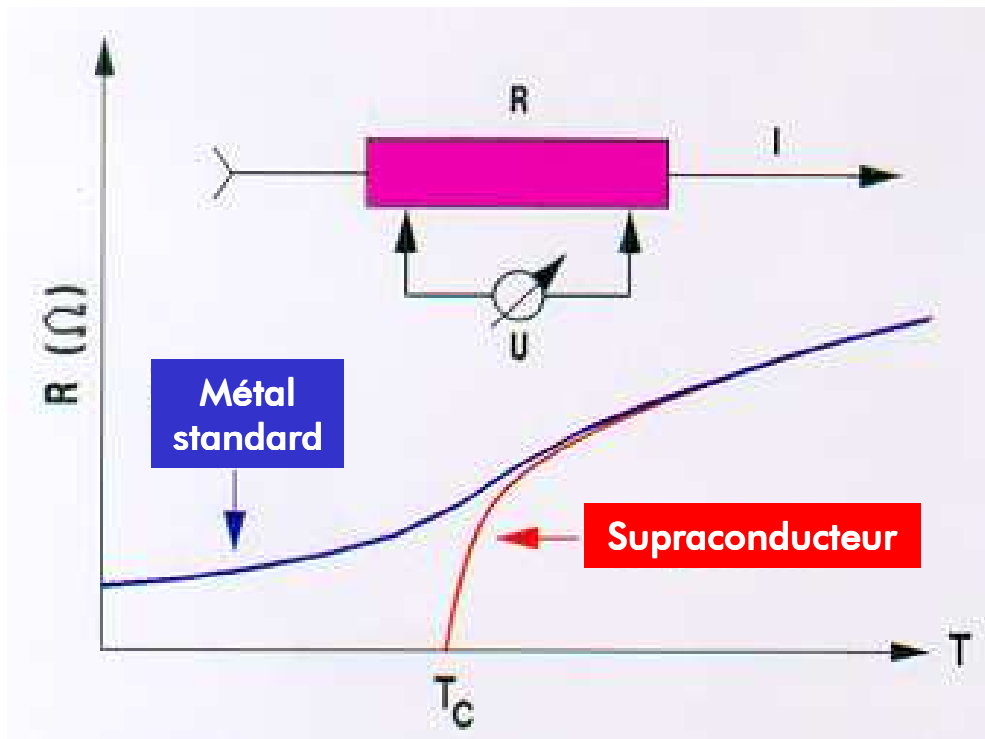
- Limiteurs de courant supraconducteurs

- Conclusion

Présentation des supraconducteurs

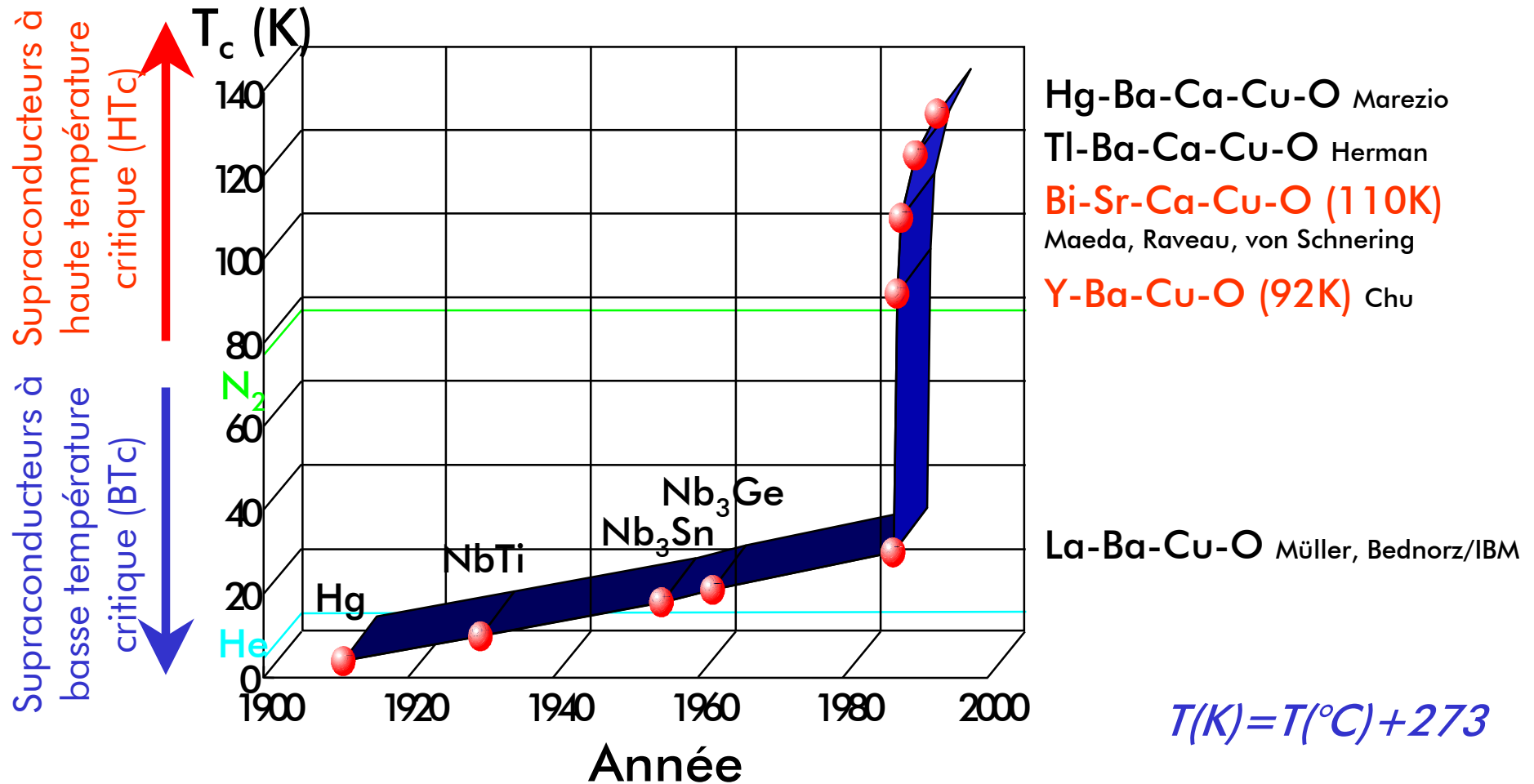
Qu'est-ce que la supraconductivité ?

Les supraconducteurs sont des conducteurs parfaits de l'électricité, sans résistance !



Présentation des supraconducteurs Historique du développement

Evolution dans le temps de la température critique T_c



Présentation des supraconducteurs

Principaux matériaux

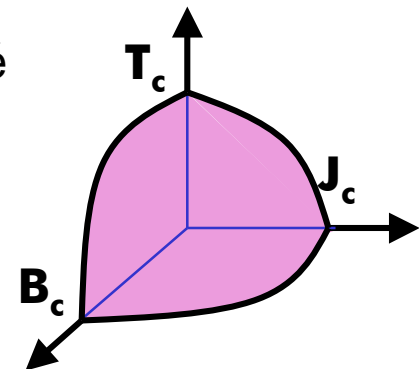
- Principaux supraconducteurs à basse température critique (BTc):
 - NbTi
 - Nb₃Sn

- Principaux supraconducteurs à haute température critique (HTc):
 - Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8-x} (Bi-2212)
 - Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10-x} (Bi-2223)
 - YBa₂Cu₃O_{7-x} (YBCO)

Présentation des supraconducteurs

Applications aux réseaux électriques

- Les matériaux HTc deviennent supraconducteurs vers -200°C
 - Un refroidissement par azote liquide, un fluide bon marché et sans danger pour l'environnement, suffit
- Les matériaux HTc permettent d'atteindre des densités de courant très importantes: environ **150** fois supérieures à celles observées dans du cuivre !
 - Les câbles supraconducteurs, par leur capacité à transmettre des courants très élevés (jusqu'à **5 kA**), fournissent une solution originale pour résoudre les problèmes de transport de puissance électrique, en augmentant l'intensité plutôt que la tension
- Les supraconducteurs deviennent résistifs lorsque la densité de courant excède la valeur critique J_c
 - Les limiteurs de courant supraconducteurs empêchent la propagation des courants de court-circuit



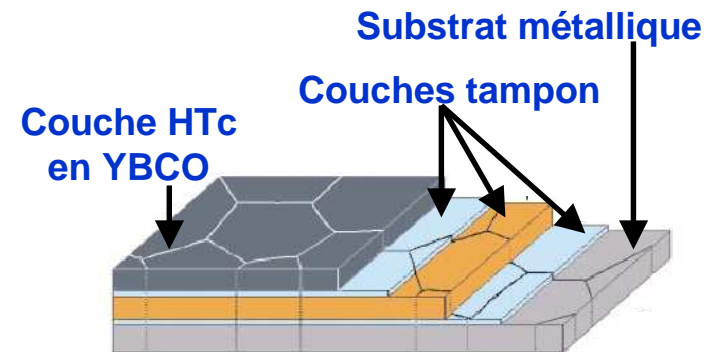
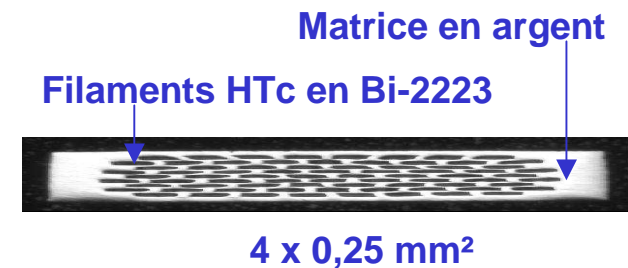
- Présentation des supraconducteurs
- Câbles supraconducteurs
 - Présentation
 - Principaux projets
 - Applications
- Limiteurs de courant supraconducteurs
- Conclusion

Présentation des câbles supraconducteurs

Composants

■ Ruban supraconducteur HTc: *Transport du courant*

- Première génération: rubans multifilamentaires en Bi-2223
- Seconde génération: rubans multicouches en YBCO



■ Enveloppe cryogénique: *Isolation thermique*



Présentation des câbles supraconducteurs

Enveloppe cryogénique



1. Tube corrugué interne en inox
2. Espaceur
3. Espace sous vide
4. Superisolant multicouche
5. Tube corrugué externe en inox
6. Protection en polyéthylène

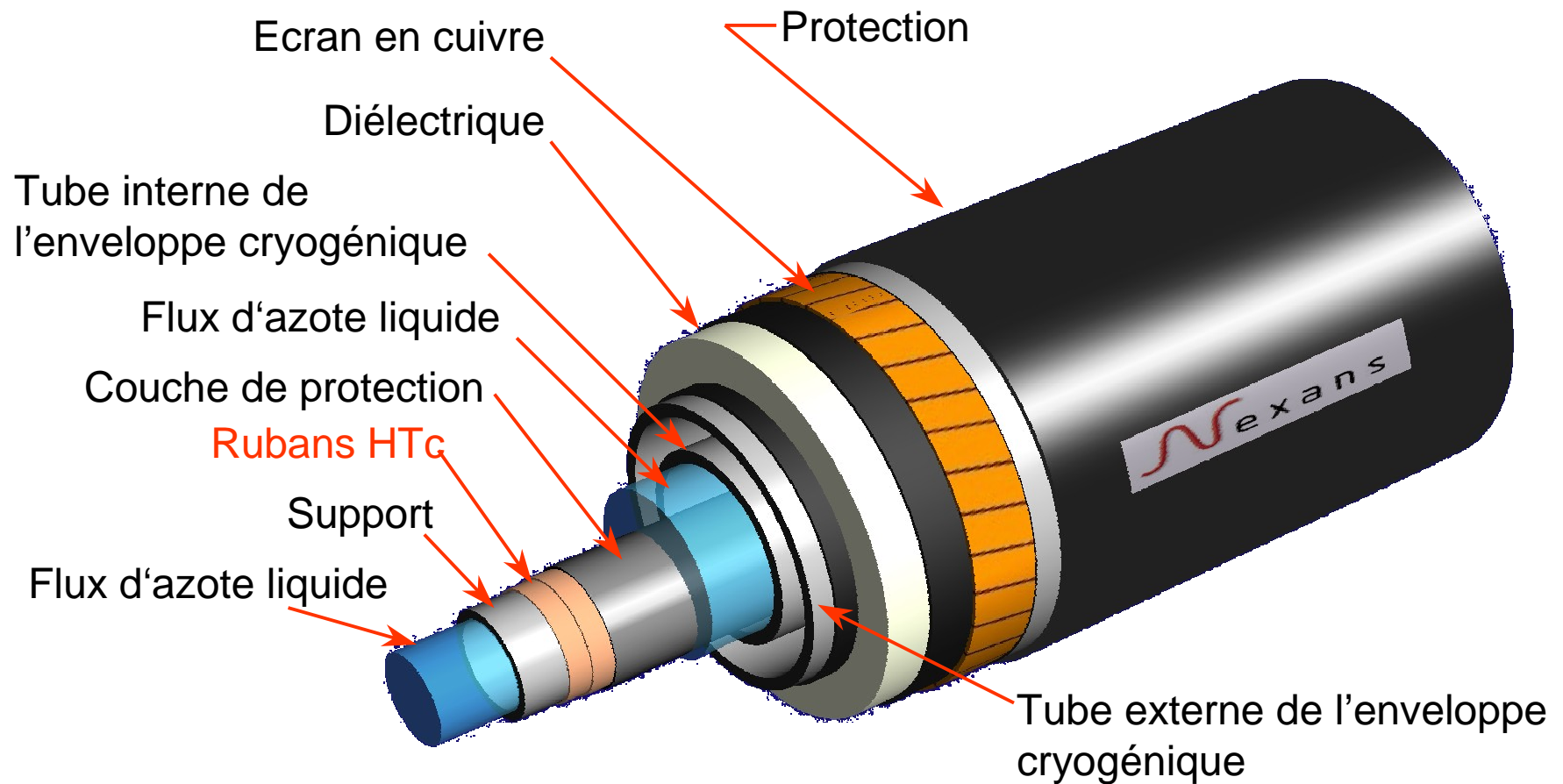
Présentation des câbles supraconducteurs

Composants

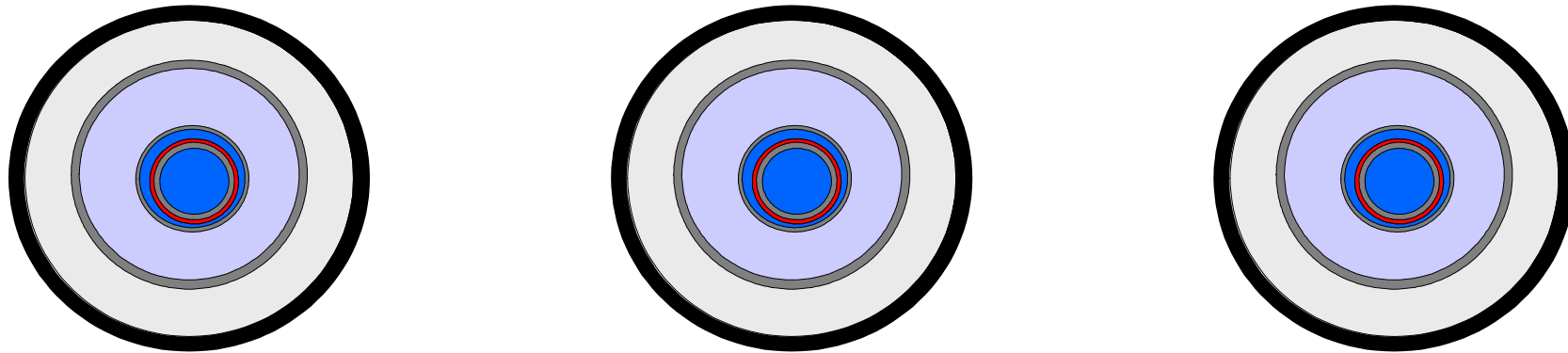
- Diélectrique: *Isolation électrique*
 - Appliqué sur l'enveloppe cryogénique → Design à diélectrique "chaud"

Présentation des câbles supraconducteurs Design à diélectrique chaud

Diélectrique conventionnel appliqué sur l'enveloppe cryogénique



3 phases séparées



- Pas d'écran supraconducteur
- Le champ magnétique nécessite d'espacer les phases



Design peu intéressant

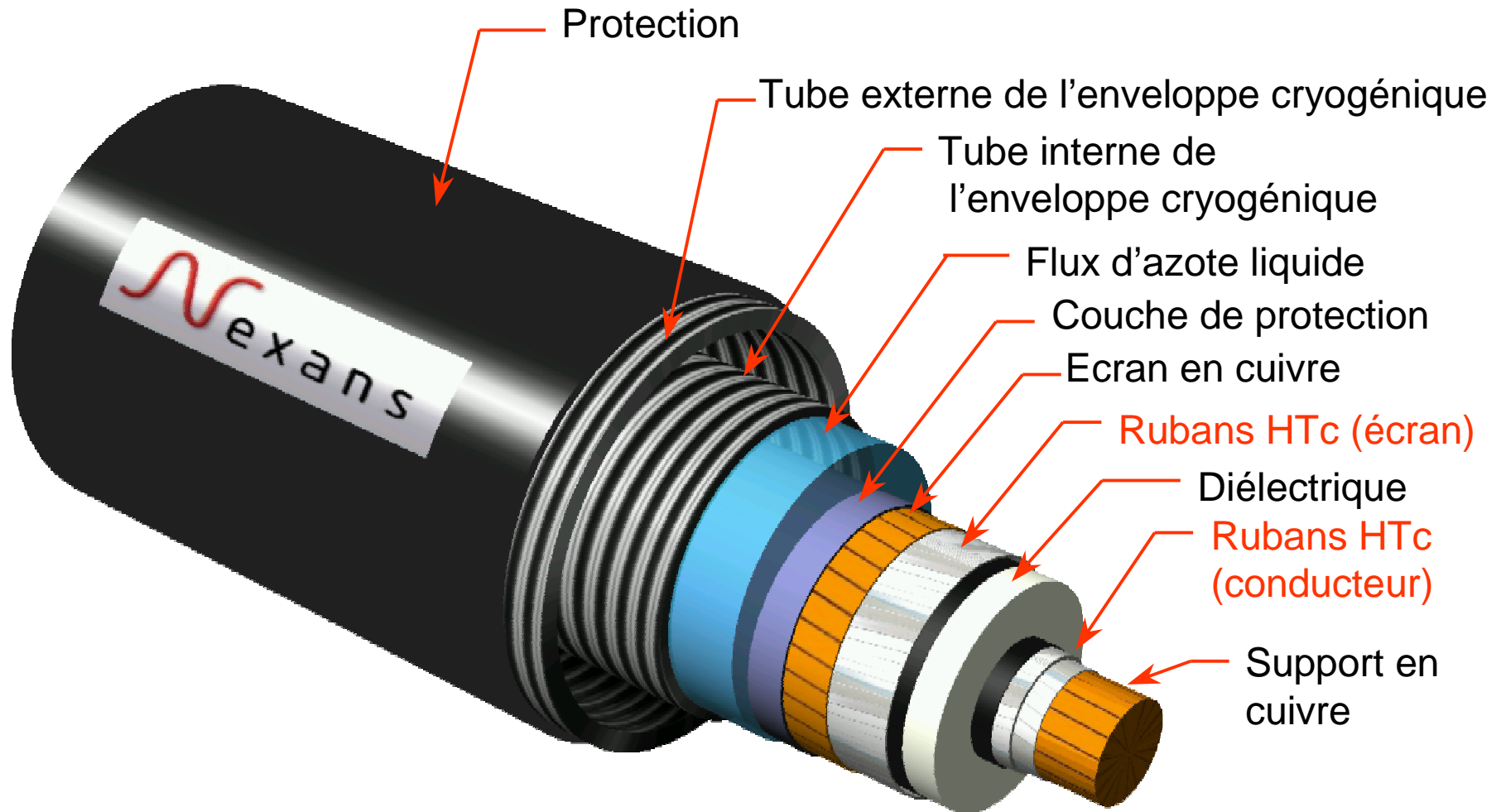
Présentation des câbles supraconducteurs

Composants

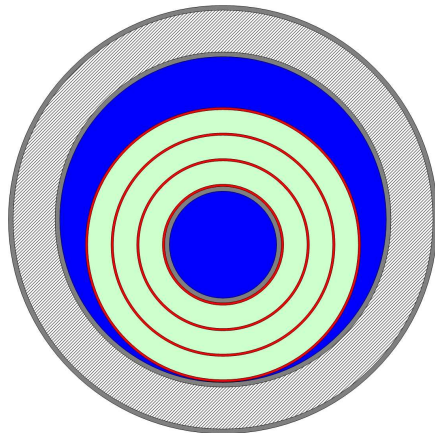
- Diélectrique: *Isolation électrique*
 - Appliqué sur l'enveloppe cryogénique → Design à diélectrique "chaud"
 - A l'intérieur de l'enveloppe cryogénique → Design à diélectrique "froid"

Présentation des câbles supraconducteurs Design à diélectrique chaud

Diélectrique dans l'azote liquide

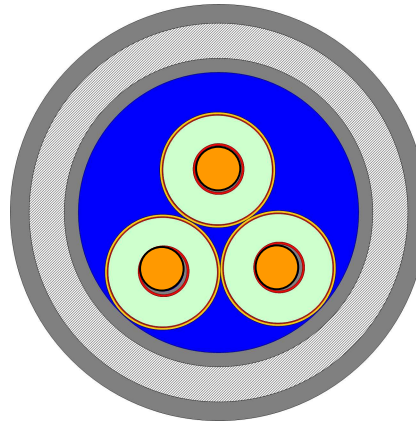


Phases concentriques



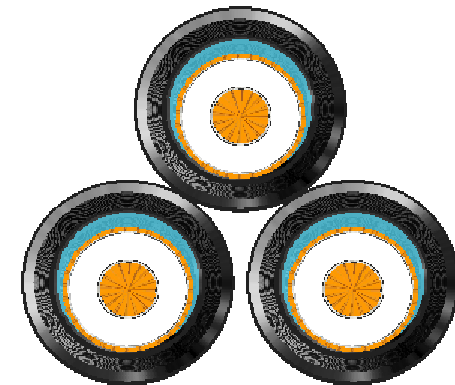
- Pas de champ électromagnétique
- Structure compacte
- Minimise le nombre de rubans HTc
- Applications en moyenne tension

Enveloppe cryogénique commune aux 3 phases



- Pas de champ électromagnétique
- Structure moyennement compacte
- Contraction / dilatation dans l'enveloppe cryogénique
- Applications en moyenne tension

Phases séparées

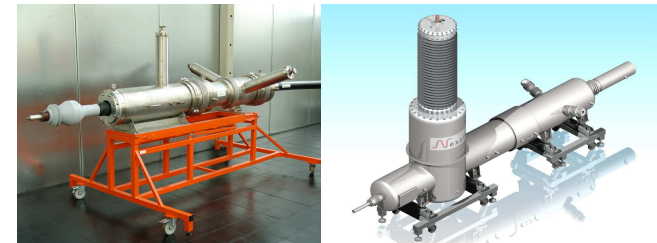


- Pas de champ électromagnétique
- Maximise les longueurs unitaires
- Applications en moyenne tension et en haute tension

Présentation des câbles supraconducteurs

Composants

- Diélectrique: *Isolation électrique*
 - Appliqué sur l'enveloppe cryogénique → Design à diélectrique "chaud"
 - A l'intérieur de l'enveloppe cryogénique → Design à diélectrique "froid"
- Accessoires:
 - Terminaisons: *Connexion au réseau électrique*
 - Jonctions: *Connexion des sections de câbles*

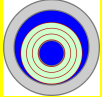


- Présentation des supraconducteurs
- Câbles supraconducteurs
 - Présentation
 - Principaux projets
 - Applications
- Limiteurs de courant supraconducteurs
- Conclusion

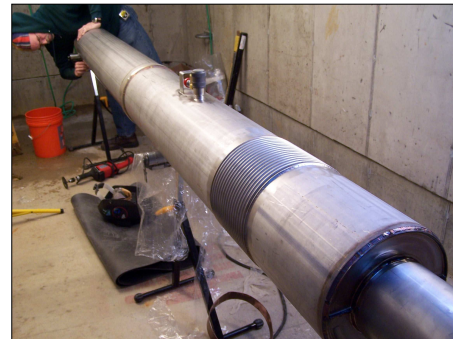
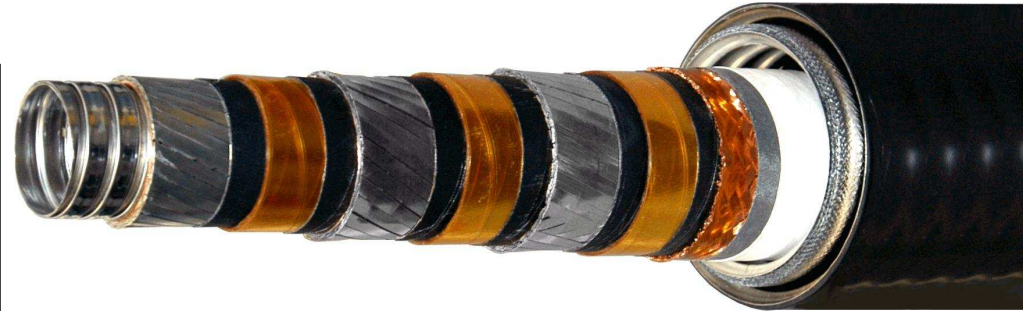
Câbles supraconducteurs

Principaux projets

Trois principaux projets aux Etats-Unis avec des rubans HTc de première génération

Design	Câbleur	Lieu	Electricien	Caractéristiques du câble	Mise en service
	Southwire (Ultera)	Columbus (OH)	AEP	200 m - 13,2 kV - 3 kA - 69 MVA	Août 2006

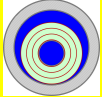

Projet Southwire/NKT (Ultera) à Columbus



Câbles supraconducteurs

Principaux projets

Trois principaux projets aux Etats-Unis avec des rubans HTc de première génération

Design	Câbleur	Lieu	Electricien	Caractéristiques du câble	Mise en service
	Southwire (Ultera)	Columbus (OH)	AEP	200 m - 13,2 kV - 3 kA - 69 MVA	Août 2006
	Sumitomo	Albany (NY)	Niagara Mohawk	350 m - 34,5 kV - 0,8 kA - 48 MVA	Juillet 2006

Projet SuperPower/Sumitomo à Albany

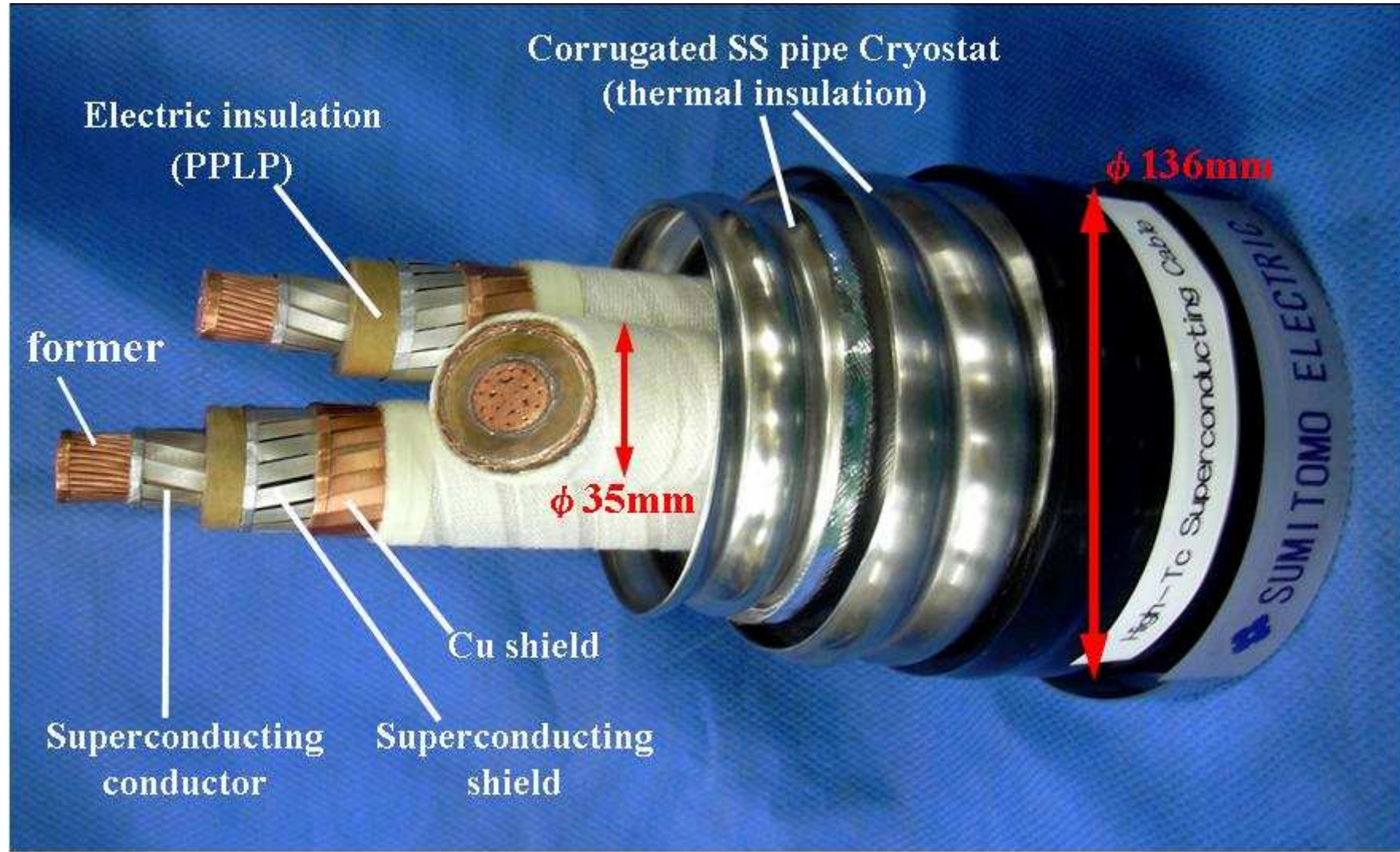
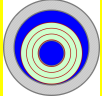
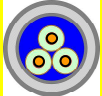



Photo: Courtesy of Sumitomo Electric Industries

Câbles supraconducteurs

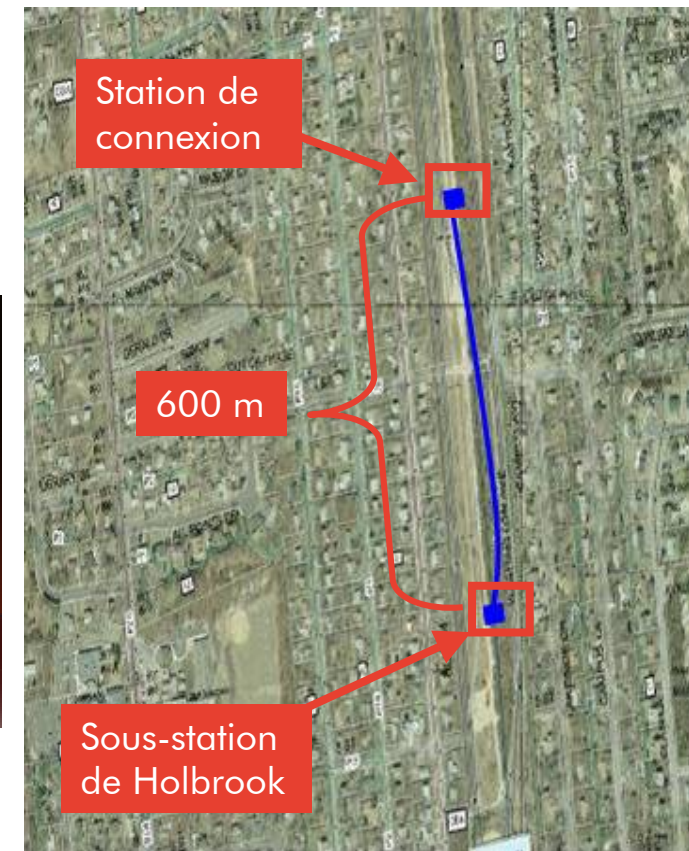
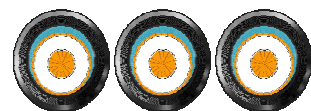
Principaux projets

Trois principaux projets aux Etats-Unis avec des rubans HTc de première génération

Design	Câbleur	Lieu	Electricien	Caractéristiques du câble	Mise en service
	Southwire (Ultera)	Columbus (OH)	AEP	200 m - 13,2 kV - 3 kA - 69 MVA	Août 2006
	Sumitomo	Albany (NY)	Niagara Mohawk	350 m - 34,5 kA - 0,8 kA - 48 MVA	Juillet 2006
	Nexans	Long Island (NY)	LIPA	600 m - 138 kV - 2,4 kA - 574 MVA	Avril 2008

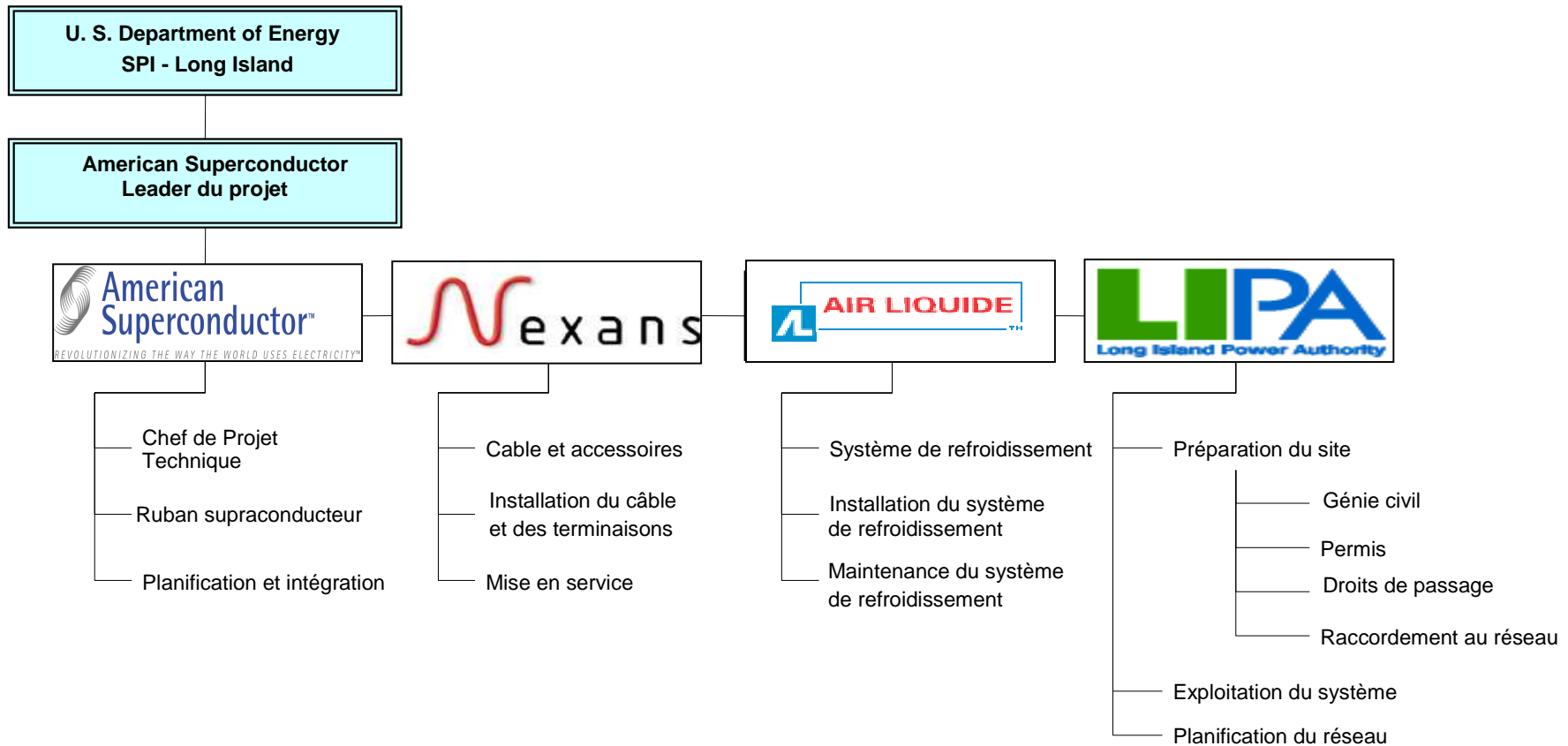
Plus long câble supraconducteur dans le monde

- Câble de 600 m à phases séparées pour la Long Island Power Authority (LIPA)
- 138 kV / 2,4 kA ~ 574 MVA
- Courant de court-circuit: 51 kA pendant 200 ms
- Installation par tirage dans des conduites en polyéthylène



Projet LIPA

Partenaires

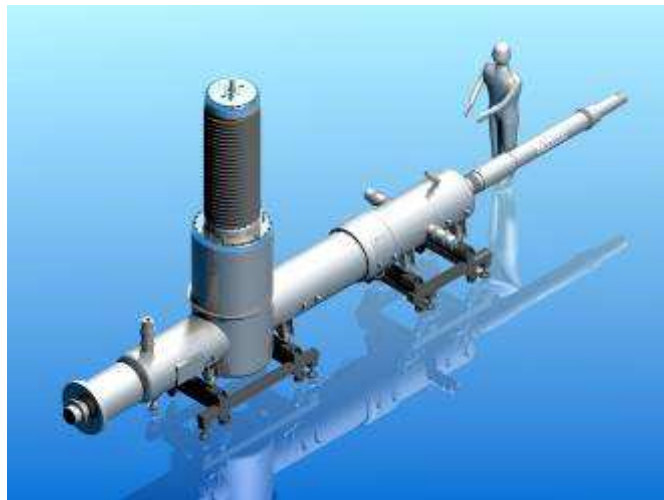
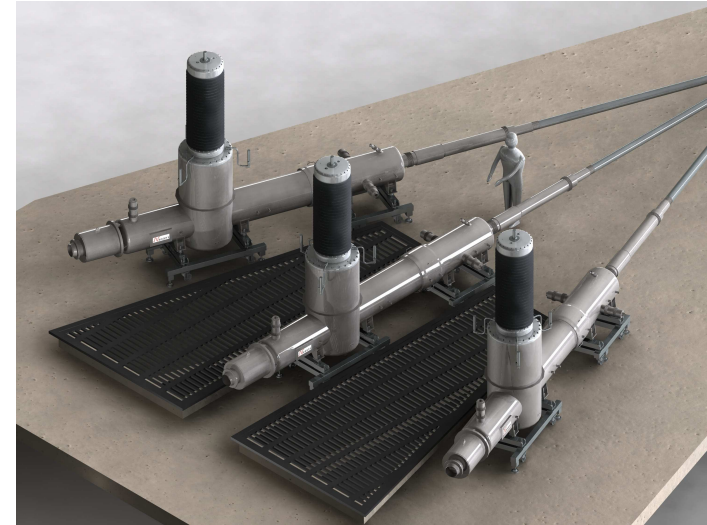


Terminaison LIPA Conception



■ Partie verticale:

- Raccordement au réseau
- Gestion du gradient thermique entre l'azote liquide (environ -200°C) et l'extérieur (autour de 20°C)



■ Partie horizontale:

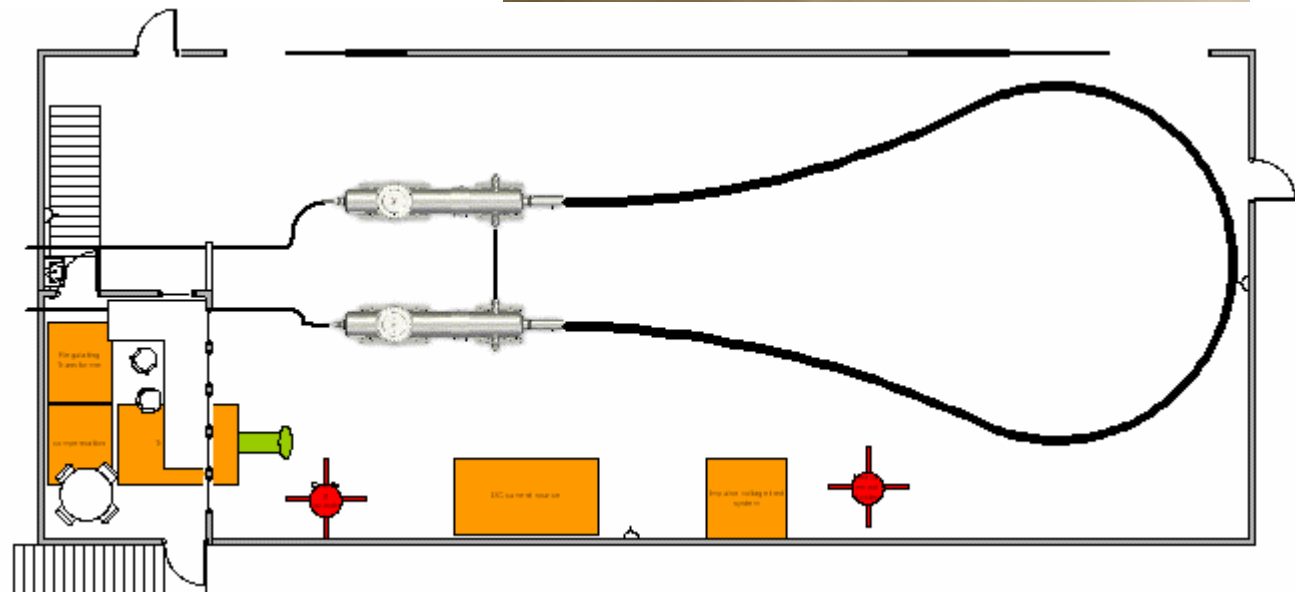
- Raccordement au câble
- Gestion de la contraction / dilatation thermique du câble



Projet LIPA

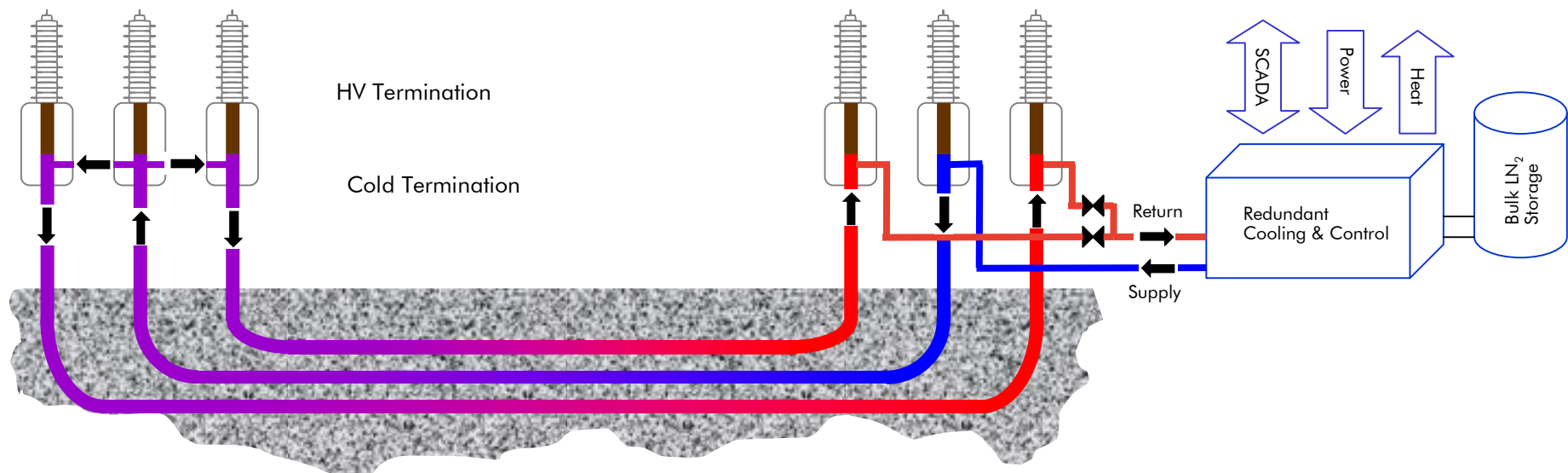
Qualification des prototypes

- Les prototypes du câble et des terminaisons furent testés dans le centre de tests haute tension de Nexans Hanovre
- Cage de Faraday de 30 m x 12 m x 9 m connectée à un système de refroidissement par azote liquide



Projet LIPA

Circuit de refroidissement



Projet LIPA

Expédition et installation du câble



Chargement d'une phase à Hanovre



Tirage d'une phase à Long Island

Projet LIPA

Terminaisons installées



Projet LIPA

Connexion au réseau



Câble raccordé au réseau de LIPA le 22 avril 2008

Câbles supraconducteurs

Principaux projets

Trois projets de 30 m avec des rubans HTc de seconde génération

Design	Câbleur	Lieu	Electricien	Nombre de phases	Caractéristiques du câble	Mise en service ou fin des tests
	Sumitomo	Albany (NY, USA)	Niagara Mohawk	3	350 m - 34,5 kA - 0,8 kA	Début 2008
	Nexans	Hanovre (Allemagne)		1	30 m - 138 kV - 1,8 kA	Mai 2007

Projet Nexans-American Superconductor

Premier câble au monde avec des rubans HTc de seconde génération !

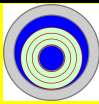

- Nexans et American Superconductor ont fabriqué et testé avec succès le premier câble au monde incorporant des rubans HTc de seconde génération pour le transport du courant
- Ce câble monophasé de 30 m conçu pour 138 kV fut testé dans le laboratoire haute tension de Nexans à Hanovre
- Une capacité de transport de 435 MVA fut démontrée



Câbles supraconducteurs

Principaux projets

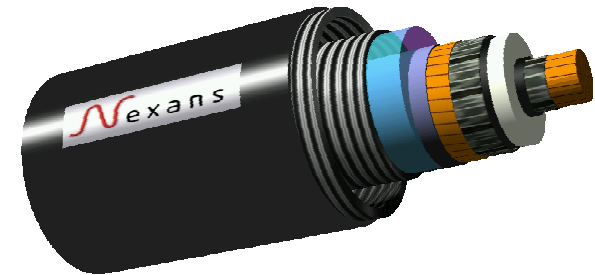
Trois projets de 30 m avec des rubans HTc de seconde génération

Design	Câbleur	Lieu	Electricien	Nombre de phases	Caractéristiques du câble	Mise en service ou fin des tests
	Sumitomo	Albany (NY, USA)	Niagara Mohawk	3	350 m - 34,5 kA - 0,8 kA	Début 2008
	Nexans	Hanovre (Allemagne)		1	30 m - 138 kV - 1,8 kA	Mai 2007
	Nexans	UE (13 partenaires)	E.ON	1	30 m - 10 kV - 1,0 kA	Décembre 2008



Projet européen Super3C Présentation

- **Objectif:**
Démontrer la faisabilité d'un câble à faibles pertes utilisant des rubans HTc de la seconde génération pour le transport du courant
- **Principale fourniture:**
Câble prototype (design à diélectrique froid, une phase, 30 m, 10 kV, 1 kA) avec ses terminaisons
- 13 partenaires
- **Calendrier:**
Juin 2004 – Décembre 2008
- **Financement:**
Commission Européenne (FP6)



Câble Super3C



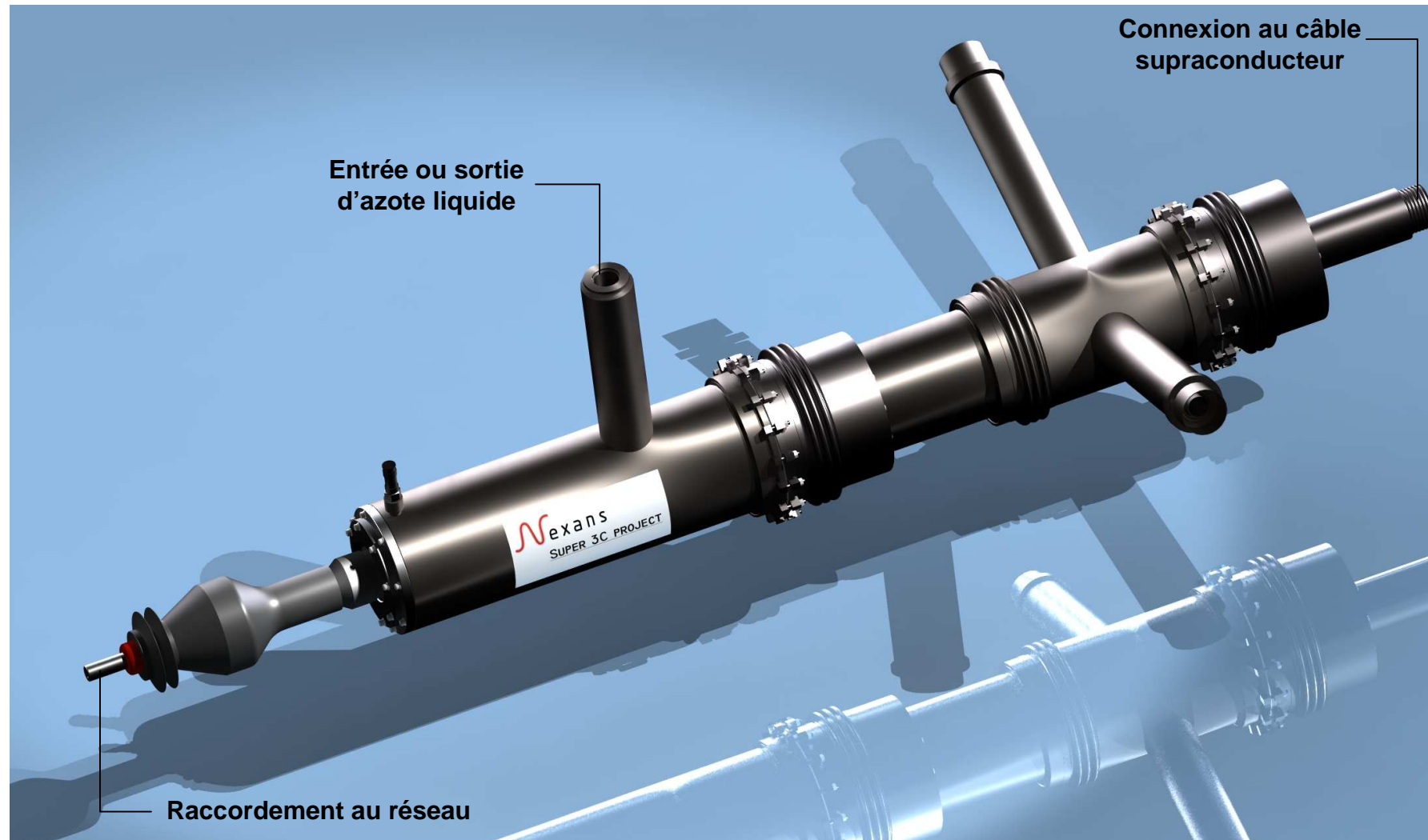
Terminaison Super3C



Projet européen Super3C Partenaires

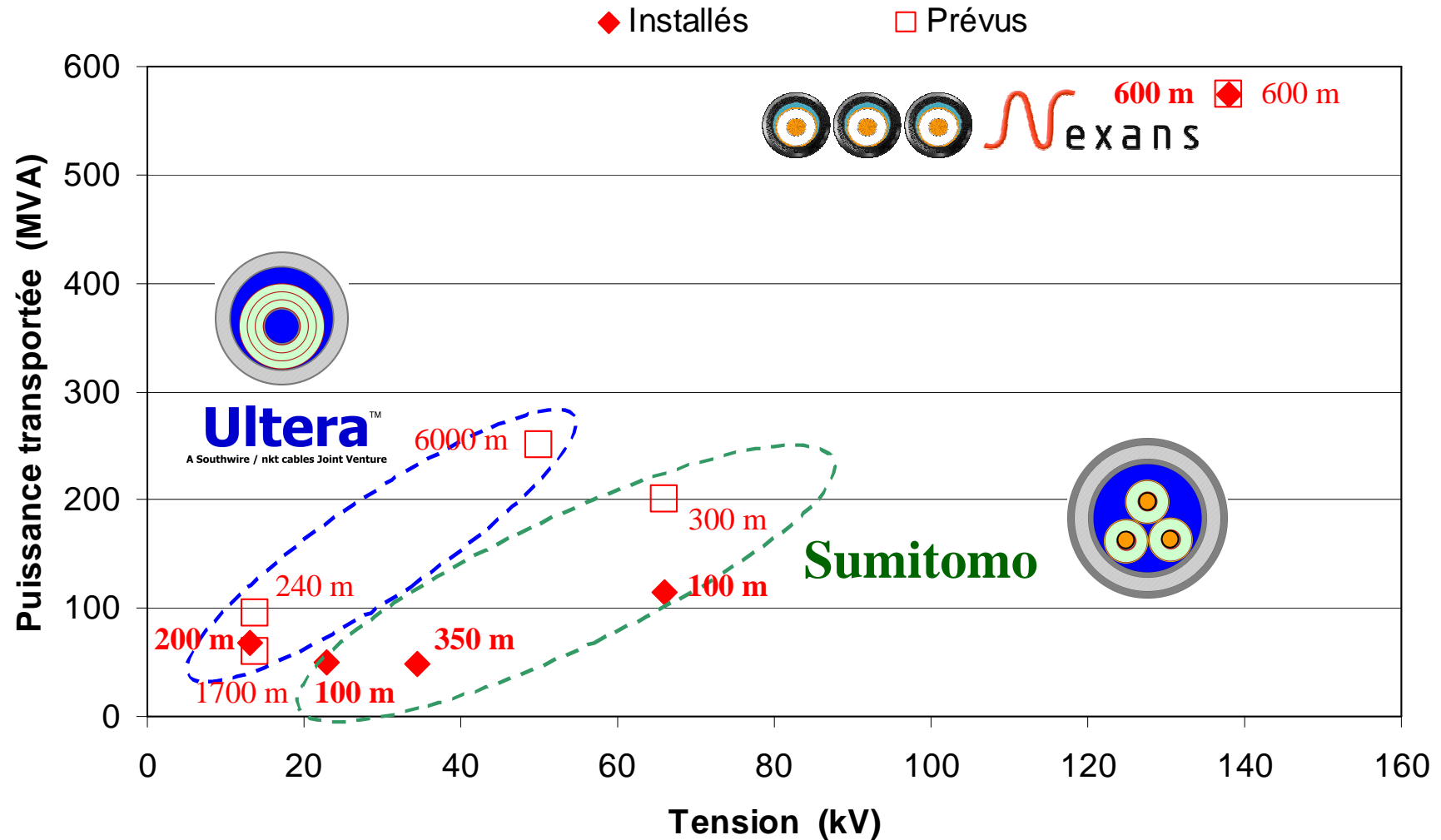
- Nexans France (Clichy et Calais): **coordination du projet et terminaisons**
- Université de Tampere (Finlande) et Institut de Génie Electrique de Bratislava (Slovaquie): **modélisation du câble**
- Bruker HTS (Alzenau, Allemagne), Institut des Sciences des Matériaux de Barcelone (Espagne), Nexans SuperConductors (Hürth, Allemagne), ZFW (Göttingen, Allemagne): **rubans HTc en YBCO**
- Nexans Norvège (Halden): **cœur du câble**
- Nexans Allemagne (Hanovre): **enveloppe cryogénique**
- Air Liquide (Grenoble, France): **système de refroidissement par azote liquide**
- Labein (Bilbao, Espagne): **test du câble**
- E.ON Engineering (Gelsenkirchen, Allemagne): **intégration des câbles supraconducteurs dans les réseaux**
- E.ON Energie (Munich, Allemagne): **impact technique, économique et social des câbles supraconducteurs**

Projet européen Super3C Terminaison



Câbles supraconducteurs Principaux projets

CÂBLES SUPRACONDUCTEURS TRIPHASES



- Présentation des supraconducteurs
- Câbles supraconducteurs
 - Présentation
 - Principaux projets
 - Applications
- Limiteurs de courant supraconducteurs
- Conclusion

Applications des câbles supraconducteurs

Principaux avantages

- Résolvent les problèmes de transport et de distribution d'électricité en minimisant la tension
 - Une augmentation du courant permet d'atteindre la puissance transportée souhaitée alors que la technologie classique nécessite une augmentation de la tension

- Sans impact sur l'environnement
 - Câble enterré
 - Pas d'impact thermique
 - Pas d'impact électromagnétique

- Permettent d'utiliser des droits de passages, voire des conduites, existants
 - Câbles plus rapidement opérationnels (obtention du permis simplifiée)

- Très faible impédance
 - Permet de faire circuler le courant dans les deux sens

Applications des câbles supraconducteurs

Exemples

- Transport de puissance à faible tension:
 - Une puissance voisine de celle d'une ligne aérienne 345 kV est atteinte avec un câble supraconducteur 138 kV (origine du projet LIPA)
- Remplacement de câbles:
 - Utilisation de droits de passage, voire de conduites, existants
- Substitution à une liaison en courant continu:
 - Suppression des stations de conversion alternatif / continu
 - Rend possible les interconnexions avec le réseau en courant alternatif
- Utilisation d'infrastructures existantes:
 - Installation sur des ponts ou dans des tunnels de service
- Nouveaux tracés:
 - Installation dans les villes sous les réseaux existants

Applications des câbles supraconducteurs Transport de grandes capacités



Objectif:

Tranférer au Connecticut 1500 MW disponibles au Massachusetts et à Rhode Island(MA/RI)

Solution classique:

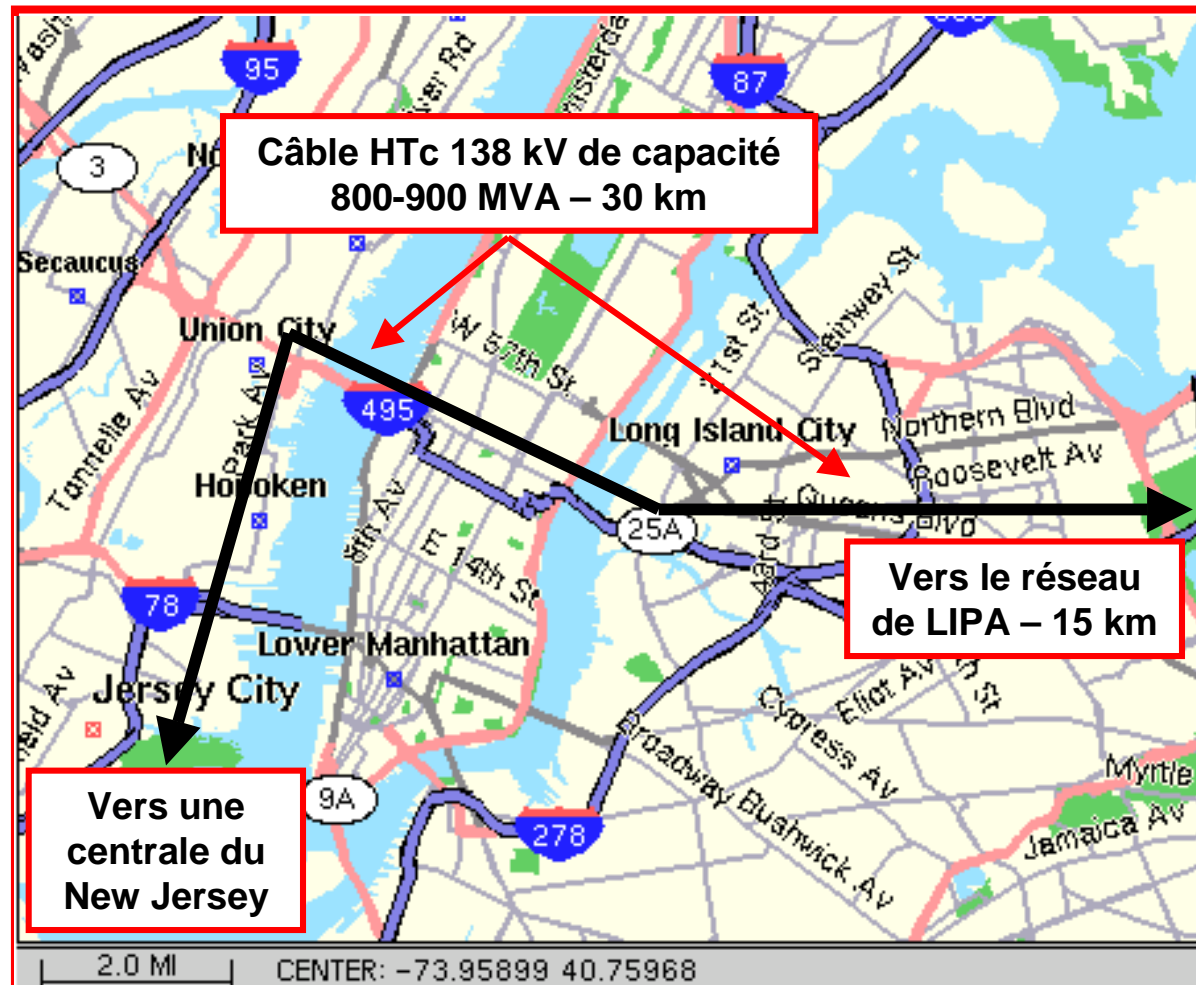
Ligne aérienne 345 kV

Solution HTc:

Câble alternatif 115 kV de 50 km de long et de 900 MVA de capacité

Applications des câbles supraconducteurs

Alternative à un câble à courant continu



Objectif:

Liaison bidirectionnelle
New Jersey-New York-
Long Island

Solution classique:

Câble à courant continu

Solution HTc:

- Câble alternatif 138 kV à très faible impédance
- Economise 200 M\$ en stations de conversion
- Permet de multiples interconnexions

Applications des câbles supraconducteurs

Résolution d'un problème environnemental



Objectif:

Passage de la rivière Sainte Croix River

Solutions classiques:

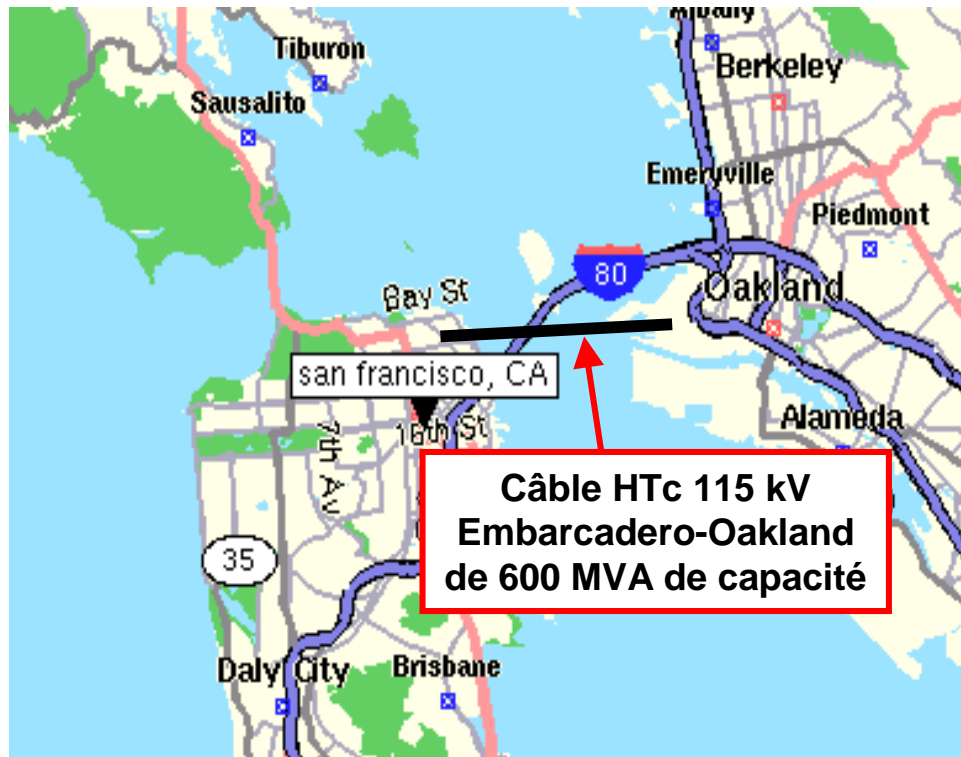
- Ligne aérienne 345 kV
- Perçage dirigé sous la rivière pour plusieurs câbles 115 kV

HTS solution:

Un câble alternatif 115 kV fixé sous le pont enjambant la rivière

Applications des câbles supraconducteurs

Génération virtuelle d'électricité



Objectif:

Approvisionnement de San Francisco à partir d'Oakland

Solution classique:

Approvisionnement par le sud de la péninsule

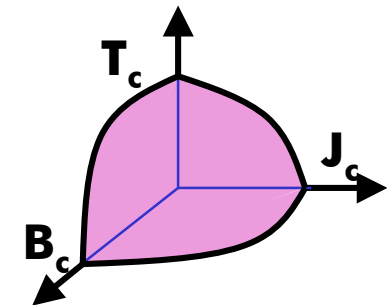
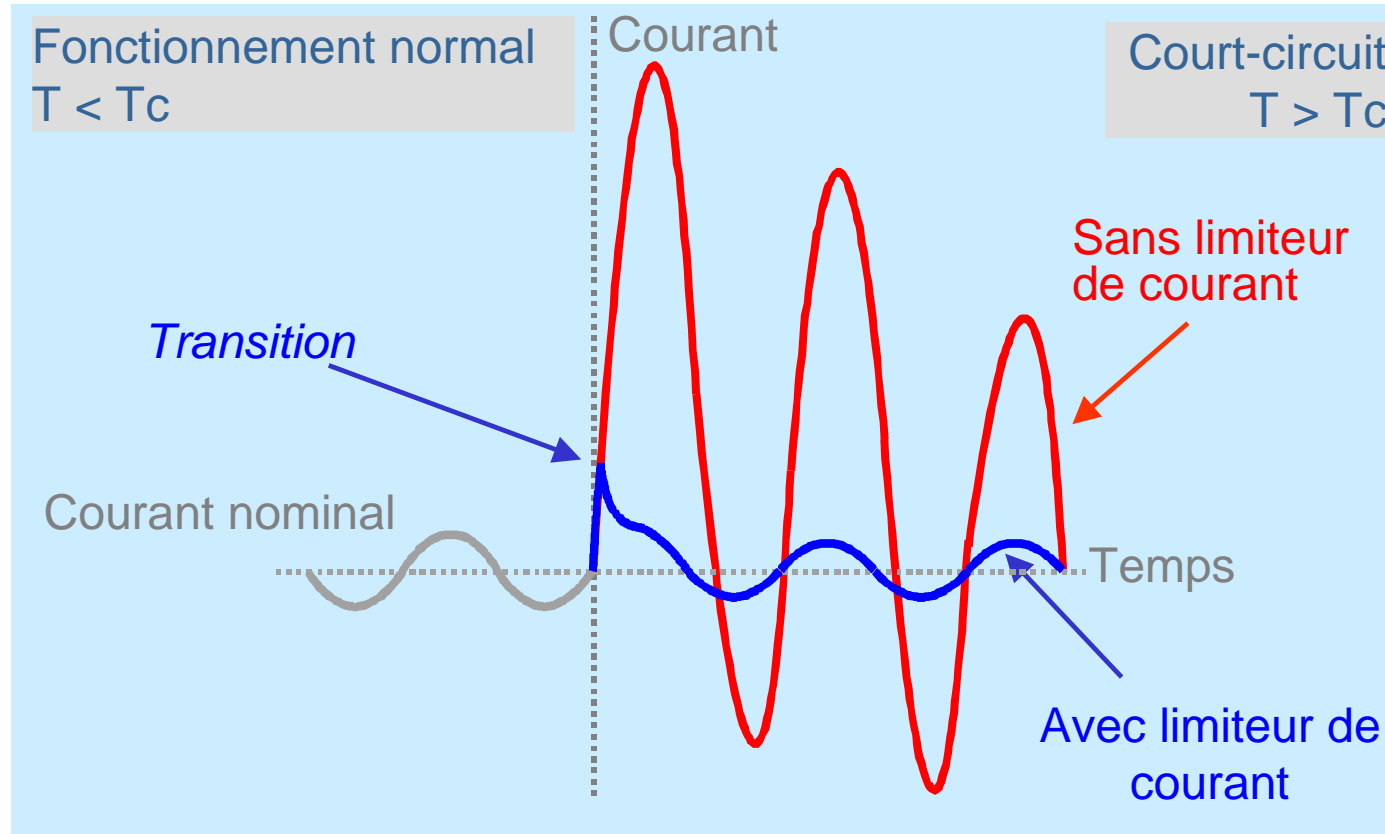
HTS solution:

- Câble 115 kV de 13 km de long et de 600 MVA de capacité
- 200 MVA utilisables sans modification du réseau
- Réduit la nécessité de conserver des centrales électriques dans la ville de San Francisco pour stabiliser la tension

- Présentation des supraconducteurs
- Câbles supraconducteurs
 - Présentation
 - Principaux projets
 - Applications
- **Limiteurs de courant supraconducteurs**
- Conclusion

Limiteurs de courant supraconducteurs

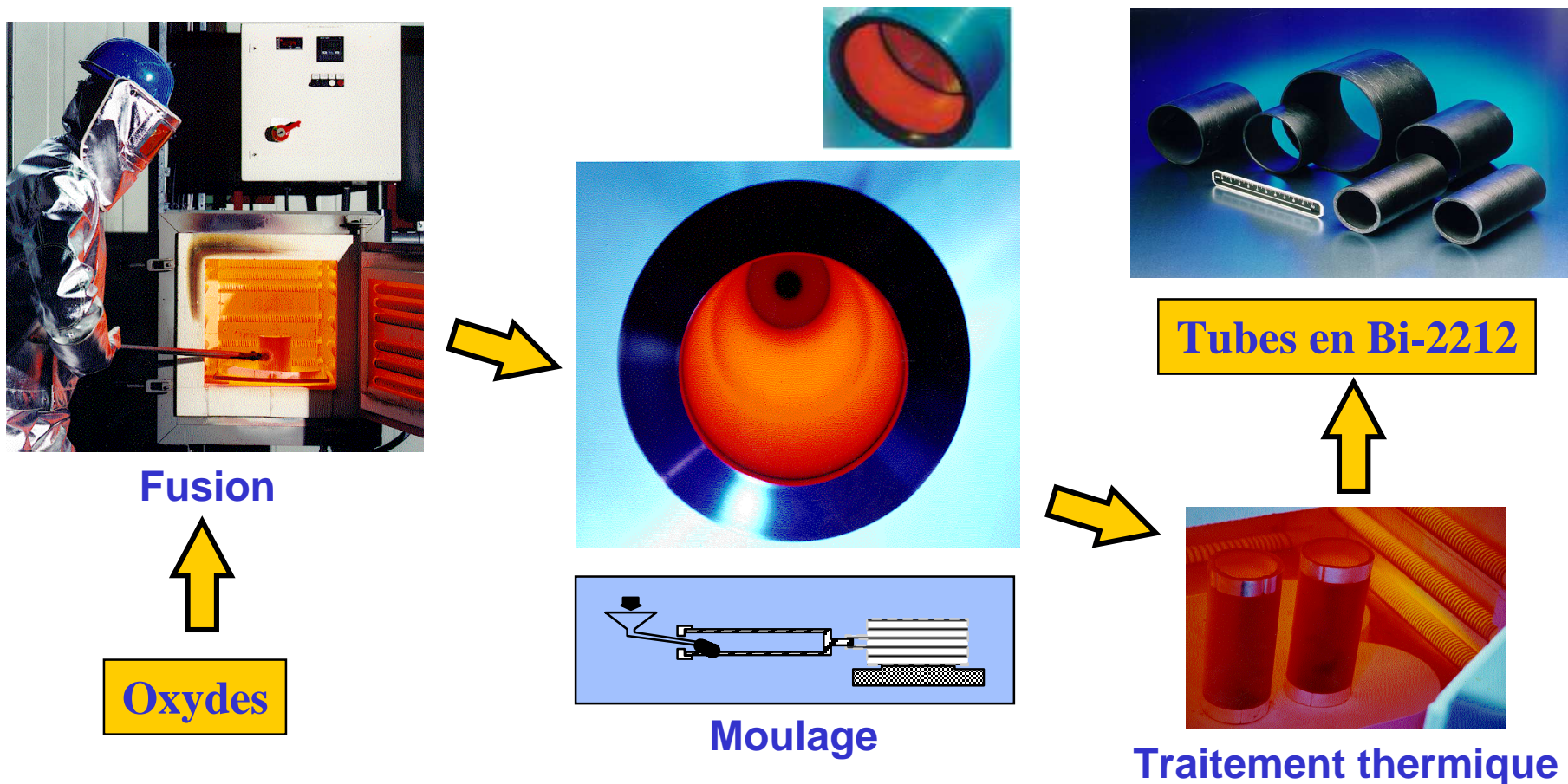
Principe de fonctionnement



Matériaux supraconducteurs adaptés: Bi-2212 et YBCO

Limiteurs de courant supraconducteurs Fabrication de tubes en Bi-2212

Nexans a développé une technologie originale pour la fabrication de pièces massives supraconductrices adaptées aux limiteurs de courant



Démonstrateur 10 kV (600 A)



**Tubes en Bi-2212
(Nexans)**



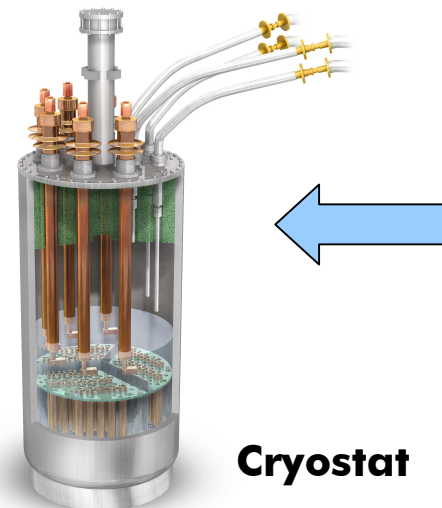
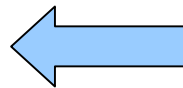
**Éléments
bifilaires
(Nexans)**



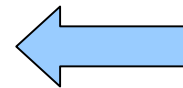
**3 phases,
30 éléments
bifilaires par
phase**



Limiteur de courant



Cryostat

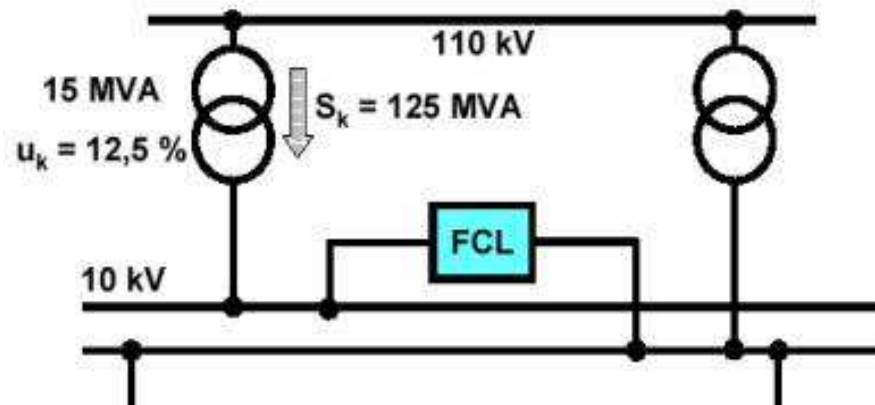


Projet CURL 10 Connexion au réseau de RWE



Tests - Field test at RWE Netphen

CURL10



Application: Connexion
de réseaux 10 kV

Avril 2004: Raccordement du limiteur
au réseau (première mondiale)

Projet pilote ASL1 Présentation

- Tension: 12 kV
- 24 éléments supraconducteurs par phase
- Courant en fonctionnement normal: 100 A
- Courant transitoire: 450 A
- Courant de court-circuit: 50 kA



Limiteur livré par Nexans en novembre 2008.

L'installation près de Manchester est prévue pour le premier trimestre de 2009.

Limiteurs de courant supraconducteurs

Avantages et applications

Avantages techniques

- Impédance négligeable en fonctionnement normal
- Compact
- Déclenchement automatique
- Réduction du courant en quelques ms
- Le courant n'est pas interrompu immédiatement
- Retour automatique et rapide à l'état supraconducteur

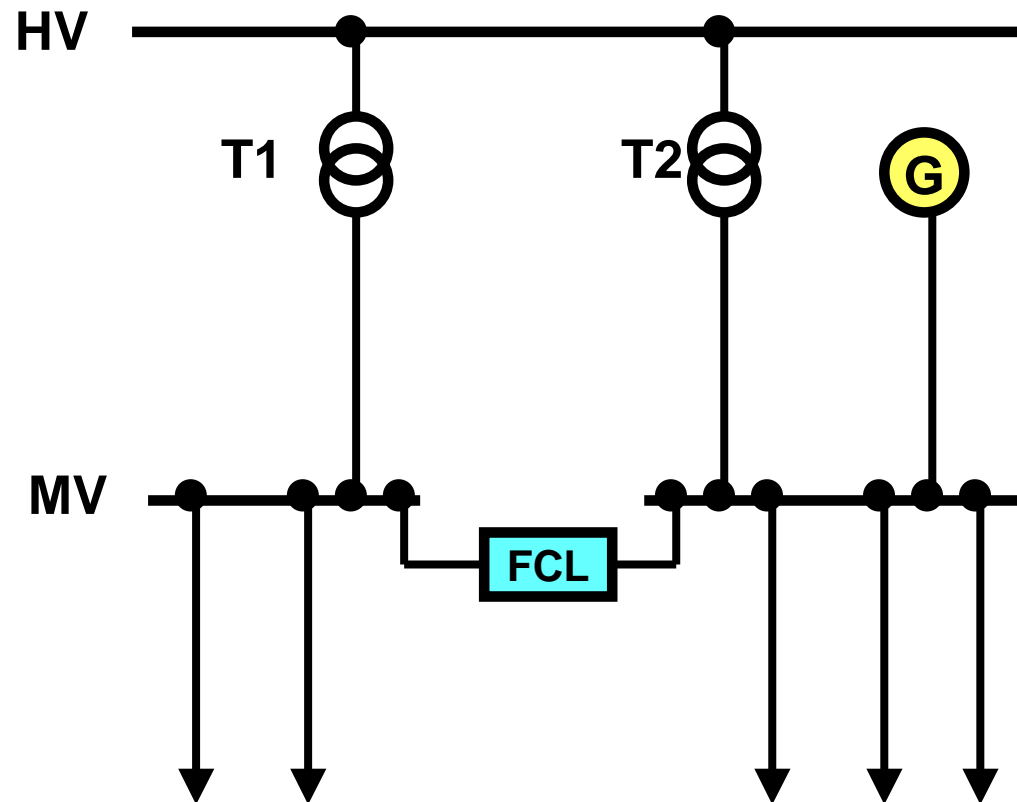
Principales applications

- Couplage de réseaux
- Intégration de sources d'énergie dispersées
- Augmentation locale de la puissance transportée sans remplacement de disjoncteurs

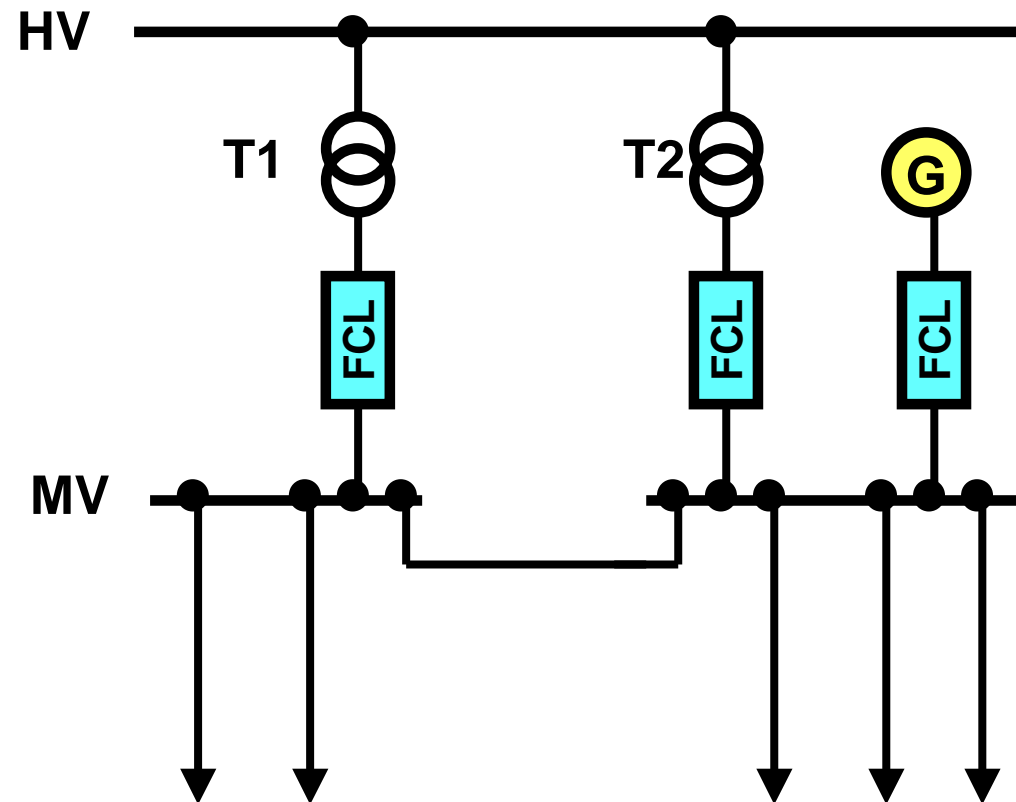
Avantages économiques et environnementaux

- Meilleure utilisation des réseaux existants
- Reports ou réductions d'investissements
- Augmentation de la durée de vie des composants des réseaux
- Augmentation de la fiabilité des réseaux

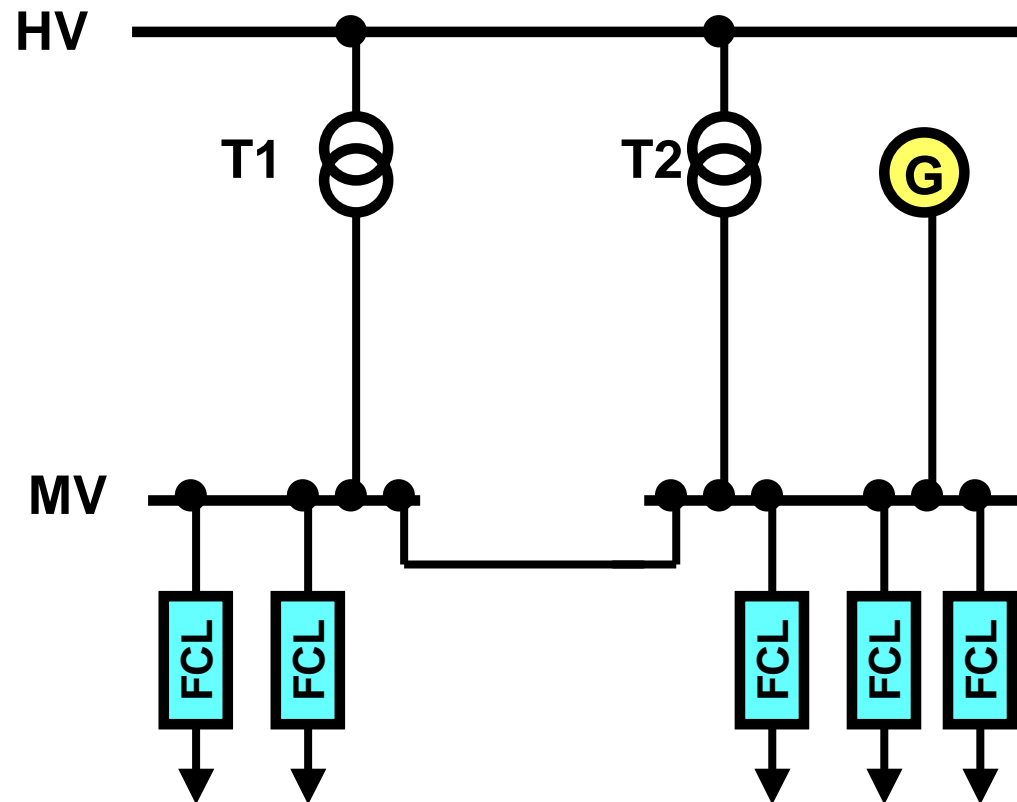
Limiteurs de courant supraconducteurs Applications



Limiteurs de courant supraconducteurs Applications



Limiteurs de courant supraconducteurs Applications



- Présentation des supraconducteurs

- Câbles supraconducteurs
 - Présentation
 - Principaux projets
 - Applications

- Limiteurs de courant supraconducteurs

- Conclusion

Conclusion

- Les câbles supraconducteurs constituent un nouvel outil pour les gestionnaires de réseaux électriques qui pourrait devenir d'autant plus utile que les contraintes environnementales rendent plus difficile la réalisation de nouvelles liaisons
- La faisabilité de la technologie des câbles supraconducteurs a été démontrée à moyenne tension et haute tension et les projets visent maintenant à:
 - Introduire la seconde génération de rubans supraconducteurs
 - Atteindre des longueurs de plusieurs kilomètres
 - Accroître le courant jusqu'à 4 ou 5 kA
- Les câbles supraconducteurs peuvent être économiquement compétitifs dans les cas où le prix élevé du câble est compensé par des économies dans l'obtention des permis, les droits de passage, le génie civil, les équipements des sous-stations,...
- Les limiteurs de courant supraconducteurs représentent une application très prometteuse des supraconducteurs HTc et deviennent disponibles pour des applications en moyenne tension

Merci pour votre attention !