



# LES AUTOROUTES DE L'ÉNERGIE

Avec la montée en puissance de l'interconnexion, les réseaux électriques sont au cœur des grands enjeux économiques et politiques mondiaux.

**L**es réseaux qui apportent l'électricité constituent des éléments structurants de notre environnement car de leur fiabilité dépend, en grande partie, notre confort et notre tranquillité. S'ils tombent en panne, nos sociétés sont paralysées. Ils sont donc une condition du progrès et du développement économique. Ainsi, d'ici à 2030, environ un tiers des investissements mondiaux pour la distribution d'électricité ira vers la création de nouveaux réseaux, notamment dans les pays en développement. Et l'augmentation de la production décentralisée d'énergies renouvelables nécessitera l'extension des réseaux actuels.

## L'électricité, vecteur de l'intégration européenne

La dimension stratégique, politique et économique des réseaux d'électricité a pris une ampleur accrue au cours des quinze dernières années. C'est le cas en Europe, où la reconfiguration récente des réseaux électriques s'est calquée sur les bouleversements politiques qui ont mis fin au partage du continent en deux systèmes politiques et électriques rigoureusement séparés. L'interconnexion des pays d'Europe de l'Est a même précédé leur intégration politique. Déjà, dans l'après-guerre, la création de l'UCTE (*Union for the Coordination of Transmission of Electricity*), pour favoriser l'interconnexion entre les différents réseaux à l'Ouest, avait été le premier jalon

## VRAI OU FAUX

**On transporte plus facilement du courant alternatif que continu. VRAI**

Avec le courant alternatif, il est simple et peu coûteux de modifier la tension en amont et en aval d'un réseau à l'aide de transformateurs pour avoir un minimum de courant à transporter (donc réduire la section des câbles et limiter les pertes).

de l'unification politique, avant même le traité historique sur la Communauté européenne du charbon et de l'acier de 1951.

La multiplication des nœuds de liaison pour réduire les « goulets d'étranglement » et les « chaînons manquants » permet à l'Europe de disposer aujourd'hui d'un des plus grands réseaux du monde, constitué de quatre blocs synchrones alimentant plus de 450 millions de personnes pour une consommation annuelle de plus de 2 500 milliards de kWh. Via l'Espagne, ce réseau est également relié au Maghreb, bientôt au Proche-Orient via la Tunisie et à l'Asie mineure avant la fin de la décennie, via la Grèce et la Turquie. C'est progressivement un véritable « anneau électrique méditerranéen » qui se constitue. Plus à l'Est, la Russie et ses voisins font le forcing pour se raccorder...

## L'Afrique pénalisée par ses réseaux

Si l'Afrique possède un potentiel suffisant adapté à ses faibles consommations, le réseau électrique reste en revanche morcelé. Mal géré, souvent vétuste, peu efficace et surtout notoirement insuffisant au regard des besoins, son développement est lourdement pénalisé.

La planification énergétique a, en outre, toujours relevé directement des États. Aussi une initiative comme celle des 14 membres de la Communauté économique des États de l'Afrique de l'Ouest (CEDEAO) traduit-elle

une prise de conscience salutaire. Soutenue par des financements internationaux, elle vise à accroître l'offre d'électricité (5 600 km d'interconnexion pour une puissance installée de 10 000 MWe) en établissant les premières coopérations transfrontalières subsahariennes.

## Fréquences asynchrones en Amérique du Sud

Le principe de l'unification des réseaux centraméricains a été posé dès 1997. Si les infrastructures ont été prioritaires, le rapprochement des procédures et dispositifs réglementaires s'est révélé complexe et long à mettre en place. L'objectif est d'améliorer la fourniture d'une électricité fiable à quelque 34 millions de personnes. Pour cela, une ligne de 230 kV doit être tirée sur plus de 1 800 km, grâce à l'association de fonds publics et privés.

Plus au sud, l'Amérique latine connaît une assez faible intégration des réseaux régionaux, due notamment aux différences de fréquences (50 et 60 Hz) et au déséquilibre énergétique engendré par les deux « géants » que sont l'Argentine et surtout le Brésil, premier consommateur et producteur d'électricité de la région. Face à une demande d'électricité qui croît de plus de 3 % par an,

**INTERCONNEXION**  
Liaison entre deux réseaux électriques nationaux ou, dans certains cas, régionaux, généralement synchrones (50 ou 60 Hz). Une liaison entre deux réseaux asynchrones nécessite une interconnexion en courant continu, complexe et onéreuse à mettre en œuvre.





## MOT À MOT

## DISPATCHING

Centre névralgique d'exploitation où des opérateurs spécialisés surveillent 24 h / 24 l'état du réseau et ajustent la répartition de la production en fonction de l'évolution de la demande.

## DISTRIBUTION

Transport d'électricité sur des réseaux moyenne et basse tension vers des sociétés de distribution ou vers l'utilisateur final.

## FORUM DE FLORENCE

Processus de concertation et de régulation dans le domaine de l'électricité initié par la Commission européenne en 1998 et qui a présidé à l'organisation du marché unique de l'électricité.

## OUVERTURE DES MARCHÉS DE L'ÉLECTRICITÉ

Réforme qui, partout dans le monde, a fait évoluer depuis plus de dix ans l'organisation intégrée et verticale du secteur électrique en séparant les responsabilités de producteur, de transporteur et de distributeur.

## TRANSMISSION

Se réfère au transport d'électricité sur de grandes distances et sur des réseaux interconnectés en très haute tension à partir des centrales (nucléaires, thermiques, hydrauliques...).



le Brésil pâtit d'un réseau très insuffisant. Les pertes en lignes sont parmi les plus élevées de la planète, près de 16 % de la production domestique d'énergie en raison des longues distances qui le caractérisent, de l'éloignement des ressources hydrauliques, du mauvais entretien et... des branchements illégaux. Dans ces deux pays, la libéralisation des marchés de l'électricité ne s'est pas accompagnée d'un renforcement suffisant des infrastructures de réseaux et les investisseurs étrangers y ont connu de coûteux déboires...

## Amérique du Nord : une intégration à risques

Le marché de transport et de distribution de l'électricité de la première zone économique mondiale est certainement l'un des plus intégrés de la planète et la complémentarité des modes de production d'électricité est un atout très utile (hydroélectricité canadienne l'été, charbon américain l'hiver). Mais cette interdépendance a aussi démontré le risque de black-out transfrontalier.

Car, aux États-Unis, la déréglementation excessive a tout simplement « grippé » le système électrique à plusieurs reprises et révélé ses faiblesses.

À cet égard, le réseau PJM, dans le Nord-Est des États-Unis, qui fournit 25 millions de consommateurs dans sept États et qui est interconnecté à la province canadienne de l'Ontario, est emblématique. PJM ne compte pas moins de 250 compagnies membres (producteurs, transporteurs et distributeurs d'électricité),

**BLACK-OUT**  
Faisant suite à une panne purement locale, il s'agit d'une panne généralisée à l'ensemble d'un réseau, plongeant (selon l'horaire) toute une région ou plus dans le noir.

huit juridictions de régulation et transporte la production de 625 centrales utilisant divers combustibles. Or, c'est justement le réseau d'où est parti le black-out régional d'août 2003...

## Le « grand bond en avant » du réseau chinois

L'Asie « en développement » est dominée par l'Inde (voir « Avis d'expert », p. 9) et la Chine, un pays qui résume à lui seul la problématique de la zone. Cette dernière a, en 2005, une capacité installée

de 445 000 MWe et prévoit, d'ici

à 2030, d'y ajouter 860 000 MWe supplémentaires pour soutenir un développement économique spectaculaire (9,5 % de croissance en 2004).

Mais ses infrastructures de réseaux ne sont pas à la hauteur et un « grand bond en avant » est impératif tant les grandes villes manquent

d'électricité et les coupures sont fréquentes. Il existe aujourd'hui sept réseaux inter-provinces et cinq réseaux régionaux non connectés,

au point que certaines régions disposent de surplus qu'elles ne peuvent céder à celles qui en ont besoin. Décidée à rattraper ce sous-

équipement notoire, la Chine met sur pied son premier réseau électrique national de 500 kilovolts en reliant trois grands réseaux régionaux (Chine de l'Est, du centre et du Sichuan-Chongqing, à l'Ouest) autour du gigantesque projet de barrage des Trois-Gorges qui offrira à terme une capacité installée de 18,2 millions de kWe (soit 10 % de la capacité totale chinoise). ■

## CAPACITÉ INSTALLÉE

Quantité d'électricité pouvant être produite à un moment précis si tous les moyens de production (centrales, turbines hydro-électriques, éoliennes) produisent à pleine capacité au même moment.

## L'ÉLECTRICITÉ AU FIL DES RÉSEAUX

## ZOOM

## Synchronisme : 50 ou 60 Hz ?

Deux fréquences cohabitent dans le monde. Elles remontent aux origines industrielles de l'électricité, au XIX<sup>e</sup> siècle. Ainsi, en Amérique, Westinghouse a développé des centrales à 60 Hz pour les lampes à incandescence, tandis que l'Allemand AEG a fait de son 50 Hz le standard indiscuté en Europe.

Parce que l'électricité ne se stocke pas, parce que sa production doit être ajustée à une demande qui fluctue à tout instant et que sa qualité conditionne la plupart de ses applications, les réseaux qui la transportent constituent, au propre comme au figuré, l'épine dorsale de cette énergie.

Maillés, en boucle ou en étoile selon la fiabilité d'approvisionnement requise, ils se distinguent en fonction des tensions d'exploitation définies, pour l'Europe, par le Forum de Florence (voir « Mot à Mot »). Les notions de distances, de débits de circulation, de reliefs et de densification des zones traversées permettent de les comparer à un réseau routier avec, en son cœur, des dispatchings (voir « Mot à Mot ») contrôlant la fluidité du trafic. De l'autoroute à la départementale, en passant par la nationale, trois grands types de réseaux cohabitent.

## Autoroutes, nationales ou départementales ?

Transporter l'électricité sur de grandes distances en minimisant les pertes en ligne nécessite d'élever la tension en sortie de centrale, au-dessus de 20 000 volts. Les très hautes tensions, qui peuvent être assimilées à des autoroutes, acheminent l'électricité des grandes centrales à

l'échelle nationale ou internationale, via l'interconnexion. Elles sont, en Europe, de 230 ou de 400 kilovolts, de 500 kilovolts en Amérique du Nord et du Sud, avec quelques exceptions à 735 kilovolts, comme au Canada (pour relier sur 1 200 kilomètres le golfe du Labrador au nord du Québec) et même 1 150 kilovolts au Kazakhstan. À l'échelon inférieur, le transport est assuré, soit en très haute tension à 230 kilovolts, soit en haute tension dans une gamme de 50 à 150 kilovolts, vers les centres de consommation industriels et les postes régionaux. Ce sont les « nationales »...

Enfin, deux types de « départementales » sont à distinguer. D'une part, les réseaux moyenne tension de distribution secondaire (10 à 30 kilovolts) pour l'alimentation des zones urbaines et rurales. D'autre part, les réseaux basse tension. Généralement inférieurs à 1 000 volts, ils distribuent une tension de 220-230 volts ou 110 volts (selon les zones en 50 ou 60 Hz, voir « Zoom ») à l'échelon local aux habitations et petites industries environnantes.

Aux intersections, un maillage de stations de transformation et de couplage abaisse la tension de l'amont vers l'aval, la répartit vers d'autres réseaux ou vers les utilisateurs finaux et assure la protection contre les surcharges et les courts-circuits. ●●●



LES RÉSEAUX CONSTITUENT, AU PROPRE COMME AU FIGURÉ, L'ÉPINE DORSALE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE. »

Transport et distribution d'électricité : lignes haute tension.

Lignes moyenne tension.

Câbles très haute tension acheminant le courant vers les transformateurs de quartier.

Salle de contrôle d'un centre de dispatching.





Tirage de câble sous-marin vers Belle-Île-en-Mer.

### ●●● Aérien ou souterrain ?

L'impact visuel des réseaux, leur emprise au sol le long des grands « couloirs » des lignes à très haute tension constituent des sujets sensibles. Mais le problème n'est pas seulement esthétique. L'enfouissement des lignes coûte plus cher qu'en aérien (plus de dix fois pour la très haute tension). Il nécessite des stations de compensation onéreuses (tous les 15 km pour les lignes de 400 000 volts, tous les 60 km pour celles de 90 000 et 63 000 volts), et encombrantes au sol afin de corriger les importantes pertes d'énergie. L'option souterraine convient donc plutôt aux zones urbaines ou d'intérêt particulier. Pour autant que la géologie et la stabilité sismique des sols le permettent, et sachant que l'entretien de lignes enterrées est plus cher qu'en aérien (interventions plus longues et contraignantes), l'enfouissement est toujours le résultat d'un compromis entre l'intégration dans un paysage, la densité des constructions, les capacités de transport et la dimension économique. En revanche, en milieu marin (liaison France-Angleterre), la solution du câble déposé dans une tranchée sous-marine (« ensouillage ») est parfaitement appropriée.

### Pertes en réseau : des marges de progrès importantes

La limitation des pertes par dissipation de chaleur dans les conducteurs et les transformateurs est l'une des caractéristiques de la performance d'un réseau. En 2000, 1 342 millions de MWeh se sont ainsi inutilement dissipés dans le monde !

Les pays de l'OCDE affichent de bons résultats – autour de 99 %, ce qui correspond quand même à près de 6,5 % de la production d'électricité. Dans les pays en développement, du fait de la vétusté, du mauvais entretien des équipements ou des dérivations sauvages, ces pertes peuvent représenter, comme en Inde, jusqu'à 27 % de la production ! Les améliorations portent sur l'isolation des conducteurs, avec notamment des recherches sur les câbles à isolation gazeuse, insensibles aux variations climatiques, ou utilisant des matériaux supraconducteurs (« cryocâbles ») aptes à véhiculer des intensités très élevées avec des pertes réduites. Mais ces solutions, d'un coût élevé, ne concerneront que des liaisons ponctuelles où les contraintes d'encombrement sont primordiales.

### Infrastructures et environnement : des risques et des servitudes

Pylônes, poteaux et postes de transformation sont soumis à des servitudes concernant les surfaces de leur emprise au sol ou les constructions à proximité des lignes. Ainsi, pour les lignes de 400 kilovolts, les réglementations peuvent imposer des limitations de construction au-delà de 200-300 mètres, amplifiant encore davantage les problèmes d'acceptabilité de ce type d'infrastructure. ■

### La fiabilité du maillon faible en question

Une branche qui touche un fil, des lignes qui se rompent sous le poids de la glace, un pylône qui se tord sous la tempête, un relais qui disjoncte suite à une surconsommation... Il y a des risques que des pans entiers de réseaux s'effondrent, plongeant des millions de personnes dans le noir. Depuis 1999, pas moins de 11 pays ont été affectés par d'importantes coupures d'électricité, certaines plus médiatisées que d'autres. Ainsi, la France se rappelle avec émotion la tempête de Noël 1999 qui a éteint ses guirlandes. Le Nord-Est des États-Unis et une partie du Canada n'oublieront pas de sitôt le mois d'août 2003 avec ses 50 millions de personnes privées d'électricité (certaines

pendant quatre jours) ; pas plus que l'Italie et son black-out total de plusieurs heures en septembre de la même année. Mais qui se souvient de la gigantesque panne de l'Uttar Pradesh, dans le Nord de l'Inde, en janvier 2001, qui a touché quelque 226 millions de personnes ? Si les aléas climatiques ont leur part de responsabilité, la structure des réseaux, les procédures de régulation, d'alerte et d'information sont également en cause. Ainsi, à l'aube du 28 septembre 2003, en Suisse, la simple mise en contact entre une ligne de 380 kilovolts et un arbre, en amont de l'interconnexion vers l'Italie, a suffi à déclencher

des surcharges sur le réseau transalpin, notamment aux goulets frontaliers avec la France, provoquant des coupures en cascade. De plus, des moyens de communication déficients avec la Suisse ont empêché les Italiens de réagir à temps. Aux États-Unis, le sous-investissement chronique dans les infrastructures (en dix ans, les besoins en électricité y ont augmenté de 30 % tandis que la capacité du réseau n'a crû que de 15 %...) a conduit à des pannes impressionnantes et répétitives. Ce qui a fait dire à l'ancien secrétaire à l'Énergie, Bill Richardson que son pays était « une superpuissance dotée d'un réseau du tiers-monde » !

## AVIS D'EXPERT

# Quels réseaux pour soutenir la croissance ? L'EXEMPLE INDIEN...

Alors que la croissance de son PIB frôle les 7 % et que moins de la moitié des foyers sont connectés, l'Inde vient d'engager un vaste programme d'amélioration de son réseau électrique.

**Alternatives : Quels sont les points forts et les points faibles des infrastructures de transmission et de distribution d'électricité en Inde ?**

**V. RAMAKRISHNA :** Au tournant de ce siècle, nous sommes passés de la production et du transport de l'électricité orientés vers l'autosuffisance régionale au concept du « *All India basis* », l'optimisation des ressources à l'échelle du pays tout entier. Ce concept favorise l'amélioration des réseaux au détriment du transport intérieur du charbon\*. La production d'électricité étant très dispersée, nous avons divisé le pays en cinq « régions énergétiques » et nous procédons actuellement à l'intégration des importants réseaux régionaux au sein d'un système de réseau national qui se met rapidement en place. Outre le réseau régional en 400 kV, complété par un réseau en très haute tension en courant continu pour les longues distances, nous disposons également d'un réseau de 1 000 km en 765 kV. Celui-ci n'est exploité pour l'instant qu'en 400 kV et il le sera en 765 kV en temps voulu.



**V. RAMAKRISHNA,**  
Central Electricity Authority, Inde.

La distribution en haute tension (33 kV, 11 kV), et en basse tension a été négligée et constitue le point faible du système. Les raisons en sont principalement la subvention des tarifs, l'insuffisance des moyens de relevé des compteurs et les branchements illégaux. Avec, pour conséquence, une insuffisance de fourniture d'électricité (encore supérieure à 10 % des besoins) et des pertes qui peuvent atteindre jusqu'à 40 % dans plusieurs États de l'Union indienne.

**Alternatives : Comment adapter les infrastructures à l'augmentation d'une demande sous-tendue par une croissance économique très forte ?**

**V. R. :** La demande d'électricité croît en moyenne de 8 % par an. Le programme « *Electricity for all in 2012* » propose, d'ici à cette date, d'augmenter la capacité installée de 122 GW

à 221 GW. Nous accroîtrons en conséquence les transmissions en très haute et haute tension. Ainsi, le réseau de 400 kV, actuellement de 65 000 km, sera presque doublé, de même que les réseaux de distribution haute tension, tandis que la capacité des transmissions inter-régionales, qui formeront l'épine dorsale du réseau national, sera augmentée de près de 400 % ! Nous comptons également remédier aux déficiences du système de distribution au plan technique et le développer pour soutenir la croissance. Nous apportons pour cela une assistance financière aux compagnies d'électricité.

**Alternatives : Du fait d'une production très décentralisée en zones rurales, les infrastructures actuelles de distribution sont-elles compatibles avec la constitution du réseau national ?**

**V. R. :** L'*Electricity Act 2003* a conduit le gouvernement à promouvoir les systèmes de production fondés sur les énergies renouvelables et les sources non conventionnelles. Ces systèmes sont donc dispensés d'agrément officiel. Cependant, dans un contexte de forte demande comme le nôtre, ils ont un rôle complémentaire essentiel dans les régions éloignées. Cette forme courante d'énergie subsistera donc en dehors du réseau pour une période prévisible assez longue. De ce fait, le développement du système de réseau national et celui des réseaux décentralisés dans des « poches régionales » spécifiques devront se faire en parallèle. ■

\* Dont l'Inde est le troisième producteur mondial derrière les États-Unis et la Chine.

## ZOOM

La **Central Electricity Authority (CEA)** est un organisme étatique fondé en 1951. Il a pour fonction de conseiller le gouvernement indien et de coordonner tout ce qui relève de sa politique en matière d'électricité, politique concrétisée dans l'*Electricity Act (2003)* qui définit aussi bien le développement du système électrique (production, transmission et distribution), que les conditions de fonctionnement du marché.



Remédier aux déficiences du système de distribution... »