



COLLECTION EDF R&D



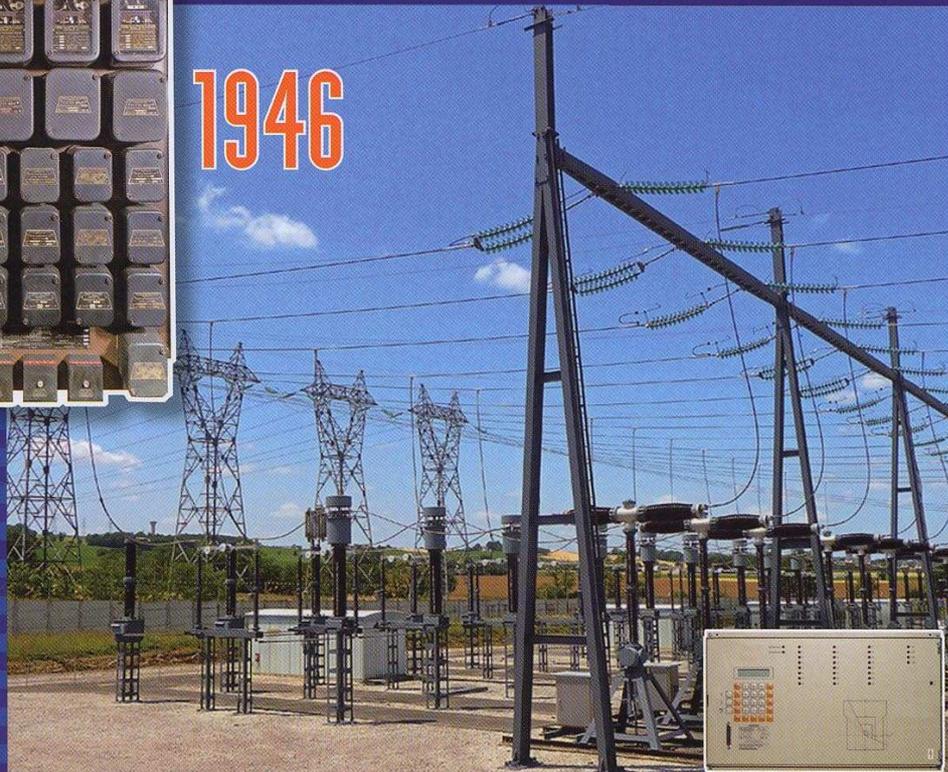
Le système nerveux du réseau français de transport d'électricité : 1946-2006

60 années de contrôle électrique

Jean-Yves Arzul • Christophe Bouneau
Richard Cazeneuve • Bernard Duchêne
Claude Fernandez • André Laurent
Jacques Lecouturier • Jacques Pérès



1946



2006

Editions
TEC
& DOC

Lavoisier

Le système nerveux du réseau français de transport d'électricité : 1946-2006

60 années de Contrôle électrique

Jean-Yves Arzul
Christophe Bouneau
Richard Cazeneuve
Bernard Duchêne
Claude Fernandez
André Laurent
Jacques Lecouturier
Jacques Pérès



11, rue Lavoisier
75008 Paris

Également disponibles

Les télécommunications au cœur du système électrique français 1946-2000

Alexandre Giandou, Claude Leclère. Jacques Lecouturier. Jean-Marc Spetebroodt. Henri Thibert. André Vilatte, 2007.

Photos de couverture

- *Poste de Verfeil : au premier plan un départ ligne avec son disjoncteur tripolaire et ses transformateurs de mesures de courant et de tension.*
- *Protection de distance électromécanique RXAP2 de la Compagnie des Compteurs (CDC), année 1946.*
- *Protection de distance numérique : 7 SA513 de Siemens. années 2000, basée sur les mêmes principes de fonctionnement que la RXAP2.*

Crédits photographiques

L'iconographie du présent ouvrage a été réalisée essentiellement à partir des fonds EDF provenant du centre des archives historiques EDF et de documents internes à l'entreprise. Quelques illustrations ont également été obtenues à partir de documents de France Telecom de rapport de la CIGRÉ de la SFR, de notices des constructeurs ayant plus particulièrement travaillé pour les protections et automatismes d'EDF et à partir des archives personnelles des agents.

- Centre des archives historiques EDF.
- Photothèque RTE.
- Photos provenant de l'Espace Contrôle-Commande de l'Électricité (ESCONCE).
- Photos de plaquettes réalisées pour EDF à l'occasion des projets.
- Photos provenant des documents internes à EDF et à RTE.
- Collection personnelle d'agents.
- Documents de sociétés savantes : CIGRE et SFE.
- Documents de l'INSEE.
- Notices de constructeurs.
- Photo « coup de foudre sur un pylône » fournie par M. Alex Hermant.



© LAVOISIER 2012
ISBN : 978-2-7430-1368-4
ISSN : 1773-5300

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle par quelque procédé que ce soit, des pages; publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands-Augustins 750116 Paris), est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (Loi du 1^{er} juillet 1992 art. L 122-4 et L 122-5 et code pénal art. 425).

Avant propos

Au milieu des années 2000, après les profondes transformations consécutives à l'ouverture des marchés du secteur de l'électricité en France alors que RTE avait atteint une certaine maturité et, après avoir initié une histoire des télécommunications à EDF¹, il m'est apparu qu'il était alors temps de retracer cette histoire particulière et pourtant essentielle, de soixante années du contrôle électrique du réseau de transport d'électricité. L'année 2006, choisie comme terme de cette histoire, est aussi celle où RTE a décidé d'adopter la technologie numérique pour la construction de tous ses nouveaux postes et pour le programme de renouvellement des postes les plus anciens.

L'engagement d'un travail de mémoire et d'inventaire, était, à mon sens, rendu d'autant plus nécessaire par le risque prévisible de destructions d'archives touchant à des techniques particulièrement évolutives mais aussi, hélas, par la disparition progressive des témoins des premières années qui ont suivi la création d'EDF et plus particulièrement de son Service du Transport de l'Electricité.

Au-delà de l'aspect historique qui contribue à la culture et à la connaissance externe de l'entreprise, je pense qu'un tel ouvrage a également un intérêt pour les agents du contrôle électrique d'aujourd'hui ne serait ce que pour leur permettre de savoir d'où ils viennent et, en particulier, comprendre certaines dispositions actuelles mais, aussi, leur montrer que ce domaine, comme d'autres, a connu de nombreuses ruptures que leurs anciens ont su surmonter et même valoriser.

Pour ne citer qu'un exemple : le passage de la technologie électromécanique à l'électronique en 1975 a sans doute été encore plus difficile pour l'ensemble des acteurs du métier que le basculement actuel vers le numérique.

Je suis reconnaissant à Dominique Maillard d'avoir décidé de poursuivre cette entreprise après mon départ en 2007 de la direction opérationnelle de RTE et, à mon tour, je tiens à remercier chaleureusement chacun des membres de l'équipe de rédaction pour la qualité du travail accompli, mais aussi pour leur passion et leur engagement que j'ai pu observer durant leur vie professionnelle et que reflète bien cet ouvrage.

André Merlin

Président des Conseils de Surveillance de RTE et d'ErDF.

Président du CIGRE.

Juin 2011

¹Giandou (A), Leclère (C), Lecouturier (J), Spetebroodt (J-M), Thibert (H), Vilatte (A), "*Les télécommunications au cœur du système électrique français 1946-2000*", Paris, Lavoisier, 2007.

Préface

En France à la fin du XIX^{ème} siècle, l'exploitation d'un système électrique de la production à la consommation était à l'échelle d'une ville ou d'une vallée, elle est aujourd'hui à la dimension de l'Europe ; elle est ainsi devenue celle d'un processus industriel géographiquement réparti. L'énergie électrique non seulement se transporte sans déplacement de matière, mais elle a en plus la particularité de l'immédiateté des phénomènes physiques mis en œuvre et ne se stocke pas. Ces trois spécificités font que la maîtrise de ce processus dépend de façon déterminante de la disponibilité conjuguée des réseaux électriques de transport et de distribution, qui lui sont associés, mais aussi des systèmes de protection et d'automatisme qui, dès les origines, ont constitué le véritable système nerveux de ces réseaux, sous l'appellation "contrôle électrique". A l'image de tout processus industriel, en France comme ailleurs, l'exploitation des systèmes électriques a pu tirer profit tout au long de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle des progrès apportés par l'évolution des techniques du traitement de l'information, ce bénéfice n'a pu être obtenu qu'au prix d'une adaptation permanente des hommes qui ont inventé, mis en place, et exploité ces systèmes.

La période considérée s'écoule de la fin de la deuxième guerre mondiale au début des années 2000, c'est-à-dire, pour le secteur de l'électricité en France, celle organisée d'abord par la loi de nationalisation d'avril 1946 puis par la loi de modernisation du secteur électrique, adoptée le 10 février 2000. De nombreux ouvrages concernant l'histoire des divers aspects et différents métiers de l'entreprise EDF ont déjà été publiés, comme une histoire de son service du Transport et des Télécommunications² et le seront vraisemblablement encore. En revanche, s'agissant du domaine des protections et des automatismes du réseau de transport d'électricité, cet ouvrage est le premier qui retrace l'histoire, au cours des soixante dernières années, à la fois des équipements mais aussi des hommes qui les ont mis en œuvre.

Une petite équipe d'anciens collaborateurs de ce qui pendant près de cinquante années s'est appelé Service du Transport d'Énergie et des Télécommunications et, qui associé à ce qui fut le Service des Mouvements d'énergie, est désormais devenu en 2000 le Gestionnaire du Réseau de Transport d'Électricité (RTE), accompagnée par un historien spécialiste d'histoire des entreprises, s'est consacrée à cette tâche. Cette mission faite de persévérance, commencée en 2007, a été confrontée à l'état souvent lacunaire des sources écrites et nécessitant en compensation le recueil de nombreux témoignages oraux. Les auteurs se sont efforcés de conduire ces interviews en conservant un juste équilibre entre distanciation indispensable à toute démarche historique et sympathie naturelle avec ce qui fut l'objet de tout ou partie d'une vie professionnelle, ils ont su conserver un juste équilibre aussi entre technicité, rapports humains et analyse des décisions prises au fil des époques.

Le résultat de ce travail est destiné à toutes les personnes qui s'intéressent à l'histoire des systèmes de protection et d'automatisme et à celle des entreprises d'électricité, mais bien entendu aussi à tous ceux qui, à différents titres et responsabilités, en trois générations successives pendant plus d'un demi-siècle, ont été les acteurs de cette histoire du "contrôle électrique au service du système électrique français". Il est laissé, en leur nom, comme en héritage, à ceux qui dans un contexte institutionnel, économique et technologique différent sont appelés à prendre leur relève : mettre en œuvre des systèmes intelligents de contrôle du réseau de transport d'électricité au service de la poursuite des mêmes objectifs de :

- ◇ sûreté de fonctionnement,
- ◇ performance économique,
- ◇ qualité de service,

qui restent les objectifs majeurs gouvernant l'exploitation des systèmes électriques.

Je voudrais remercier vivement les membres de cette équipe, pour ce remarquable travail de mémoire, réalisé avec passion, à l'image de leur vie professionnelle, et qui transparait bien dans ces pages.

Dominique Maillard
Président du Directoire de Réseau de Transport d'Électricité
Juin 2011

²André(R.), Ravel (J.), *Transport d'énergie et télécommunications, 40 ans d'histoire d'un grand service EDF*, Association pour l'histoire de l'électricité en France (AHEF), 1991.

Présentation de l'ouvrage

Cet ouvrage est issu d'un long processus dont André Merlin est l'instigateur. En fin d'année 2006, il est à l'époque Président du directoire de Réseau de Transport d'Électricité, il lance l'idée de la rédaction d'une histoire des systèmes de protections et d'automatismes du réseau de transport d'électricité³, communément connu par les spécialistes sous l'appellation "contrôle électrique". Après quelques mois d'investigations, un groupe de sept ingénieurs retraités se constitue en équipe pour prendre en charge le projet de l'histoire du contrôle électrique : Jean-Yves Arzul⁴, Richard Cazeneuve⁵, Bernard Duchêne⁶, Claude Fernandez⁷, André Laurent⁸, Jacques Pérès⁹ et Jacques Lecouturier¹⁰ qui, doté de son expérience sur "l'histoire des Télécommunications" a assuré un rôle essentiel dans la rédaction de cet ouvrage. Christophe Bouneau¹¹, professeur d'histoire contemporaine à l'Université Michel de Montaigne - Bordeaux 3, directeur de la Maison des Sciences de l'Homme d'Aquitaine et spécialiste de l'histoire des entreprises a apporté ses conseils et son appui à la rédaction.

Lors des premiers mois, l'activité du groupe est essentiellement consacrée aux questions de méthodologie et d'identification des sources. La majorité de l'équipe est, en effet, totalement étrangère à la recherche historique en général et à celle sur l'histoire d'entreprise en particulier. Cette première phase permet ainsi au groupe de prendre connaissance des méthodes de travail spécifiques à l'historien et des outils utilisés. Sont ensuite élaborés la problématique centrale du sujet et les thèmes à travers lesquels elle va être développée. La deuxième phase du travail de l'équipe est consacrée à l'identification et à la recherche des sources disponibles, écrites, notamment au centre des archives historiques EDF GDF de Blois, comme orales au moyen d'interviews. Cette période est aussi l'occasion de mener des actions dans les régions et auprès de sociétés savantes comme le CIGRÉ¹² afin de récupérer des documents du passé. Ainsi, une partie des archives

³ L'ouvrage s'intéresse exclusivement au réseau haute tension (400, 225, 150, 90 et 63 kV) dont le rôle essentiel est de transférer des puissances importantes entre points de production et points de consommation, par opposition aux réseaux de distribution, alimentés par le réseau haute tension et dont le rôle est la desserte des clients.

⁴ **Jean Yves Arzul** : ingénieur INP Grenoble, entré à EDF en 1972 au Service Contrôle Électrique du CRTT Ouest, y occupe différents postes, devient chef du service ingénierie de l'agence protections automates de l'USI Ouest, puis, à la création de RTE, chef du service ingénierie du groupe d'expertise du contrôle commande de TEO Ouest, avant de partir en inactivité en 2007.

⁵ **Richard Cazeneuve** : (Ingénieur ENSEEIHT), il a débuté sa carrière en 1974, au service Etudes du CERT et effectué l'essentiel de sa carrière dans le domaine du transport de l'électricité à EDF, puis au sein de sa filiale RTE. A l'issue d'un parcours technique et managérial diversifié (études, ingénierie, exploitation, expertise), il a pris en charge, en 2006, l'élaboration et la mise en œuvre du projet d'archivage électronique de RTE. Il part en inactivité en 2008.

⁶ **Bernard Duchêne** : ingénieur de l'Ecole supérieure d'électricité (1962). Entré à EDF en 1964, au service des Transports d'énergie et des télécommunications, il est ingénieur à la division Contrôle électrique, puis en 1972 à la section d'essais Contrôle électrique de Saint Denis. En 1977 il part au service Contrôle électrique du CRTT Alpes, et revient en 1986 dans les services centraux du Transport, au département Exploitation, division Qualité du service, où il devient chef de la division à partir de 1989. En 1990 il retourne en région comme chef du service Contrôle électrique du CRTT Ouest, puis responsable de l'agence Protections automates de l'USI Ouest, jusqu'à son départ en retraite en 1999.

⁷ **Claude Fernandez** : A l'issue de ses études au centre d'apprentissage de Castelnaudary, il obtient un CAP de monteur électricien En 1960, il est admis à l'école nationale des métiers (ENM) d'EDF de Gurcy le Châtel pour suivre la formation de vérificateur étalonneur, avec la spécialisation de contrôle électrique qu'il suit à l'ENM de La Pérolrière. En 1962, il est affecté au CRTT Paris, comme maître-ouvrier à l'équipe contrôle électrique du sous-groupe Sud, en 1964 il passe agent technique au sous-groupe Paris Ouest. De 1966 à 1980, il est successivement : agent technique puis cadre technique au "Labo de Saint Denis", de 1981 à 1982, il suit alors la formation pour les cadres issus de la maîtrise technique (promotion Wyard - Ginocchio). En 1982, il est nommé ingénieur à l'état major contrôle électrique du CRTT Sud-ouest. En 1988, il devient Ingénieur BT au sous-groupe Pyrénées. En 1996, il est directeur adjoint du groupe d'exploitation Cantal, jusqu'à son départ en inactivité en 2000.

⁸ **André Laurent** : (Ingénieur Ecole Nationale Supérieure de Mécanique de Nantes 1963) entre au CNRS en 1963 et à EDF en 1968 à la DERT, puis au service du Transport de 1969 à 1992 où il occupe différents postes : chef du service travaux Paris (1977 à 1982) au CERT, chef du département administratif et juridique au STET (1982 à 1986), chef du CRTT Sud ouest (1986 à 1992), Directeur de l'USI sud ouest de la DEPT (1993 à 1999). Il part en inactivité en mai 2001.

⁹ **Jacques Pérès** : ingénieur ENSEEH TOULOUSE, entré à EDF en 1966 au service Contrôle électrique du CRTT Ouest, il part en 1976 au CRTT Sud-ouest comme adjoint au chef du service Contrôle électrique ; il devient Chef de la division Contrôle-commande Réseau de l'USI Sud-ouest en 1993, puis chef de la division Contrôle électrique de TESO en 2000, avant de partir en inactivité en 2002.

¹⁰ **Jacques Lecouturier** : (ingénieur des Instituts d'électrotechnique (1965) et d'automatique (1966) de Grenoble), entré à EDF en 1968 à la DER où il est ingénieur-chercheur, il part pour le service de la Production hydraulique en 1974 où il a été chef de la division électricité (1986-1991). Il rejoint le service du Transport, en 1991, comme chef du département Automatisation des Réseaux, puis chef du département Contrôle-commande de la DEPT et enfin, responsable de la branche courant faible du pôle SEPR puis au RTE. Il part en inactivité en 2001.

¹¹ **Christophe Bouneau** est ancien élève de l'Ecole Normale Supérieure de Saint-Cloud et agrégé d'histoire. Spécialiste de l'histoire des réseaux techniques et de l'énergie, de l'innovation et du tourisme, il a notamment publié avec M. Derdevet et J. Percebois, *Les réseaux électriques au cœur de la civilisation industrielle*, Paris, Timée Editions, 2007 et *Entre David et Goliath. La dynamique des réseaux régionaux. Réseaux ferroviaires, réseaux électriques et régionalisation économique en France du milieu du XIX^{ème} siècle au milieu du XX^{ème} siècle*, Bordeaux, éditions de la MSHA, 2008. Il codirige actuellement un programme international de recherches interdisciplinaires sur *Les trajectoires de l'innovation*.

¹² CIGRÉ : comité international des grands réseaux d'électricité.

intéressant le contrôle électrique est sauvegardée, inventoriée et conservée à l'Espace Contrôle-Commande de l'Électricité (espace "ESCONCE" association constituée à Toulouse en 2002 en vue de "sauvegarder et de présenter les témoignages de l'histoire et de l'évolution du "contrôle électrique"). Muni de ces éléments, le groupe démarre effectivement ses recherches à partir de février 2007.

Ce livre se propose donc de retracer l'histoire de ce qui peut être considéré comme le "système nerveux du réseau français de transport d'électricité" depuis la naissance d'EDF, en distinguant quatre parties, déterminées soit par des évolutions techniques importantes soit par des changements d'organisation.

La première partie, "**le temps des bâtisseurs**", porte sur les années de 1946 à 1962. Ces années sont celles de la reconstruction et du décollage économique de la France où EDF prend une place importante avec la reconstruction et le développement des réseaux d'énergie électrique : les premières liaisons à la tension de 380 kV sont mises en service en 1958. L'année 1962 est retenue comme une césure, avec le départ en retraite de Léon Cabanes, premier chef des Transports d'énergie. Du point de vue du contrôle électrique, la période considérée ne connaît pas de révolution dans la technologie de base des équipements qui reste électromécanique. Les activités du contrôle électrique sont consacrées à la décantation des multiples systèmes de protection héritées des anciennes sociétés d'avant EDF et à la mise en place d'un plan de protection basé sur les relais de distance. Le déploiement des réenclencheurs et l'automatisation de la reprise de service permettent d'améliorer les statistiques de coupures de la clientèle. Durant cette période, l'organisation du contrôle électrique au service du Transport se met en place et les premiers stages de formation spécifique au métier sont initialisés.

La deuxième partie, "**l'apogée de la technologie électromécanique**", de 1962 à 1973, correspond à l'épanouissement de la technologie électromécanique. Toutefois, le développement économique et industriel de la France se poursuit à un rythme rapide et entraîne à la fois le développement du réseau de transport d'électricité et l'accroissement des puissances transportées. Les courants de transit deviennent ainsi de plus en plus importants, ce qui, sur certaines lignes, rend plus difficile le réglage des protections de distance et oblige à les faire évoluer. Dans ce contexte, les courants de court-circuit augmentent eux aussi, une amélioration des performances des transformateurs de courant devient nécessaire. La période est consacrée au perfectionnement du système bâti autour de la protection de distance, de façon à répondre à l'évolution des besoins du réseau et à améliorer la qualité d'élimination des défauts et la reprise de service.

La fin de la période voit l'émergence timide de l'utilisation de la technologie électronique dans les protections. La prise en compte de la nouvelle technologie et de sa future évolution vers les dispositifs informatiques conduit à modifier profondément l'organisation du contrôle électrique.

Par ailleurs, les premières réflexions sont menées sur un nouveau système de protection, afin de répondre aux exigences d'un futur réseau 400 kV alimenté par de puissantes centrales nucléaires.

La troisième partie, "**la mutation vers la technologie statique**", de 1973 à 1992, débute avec le choc pétrolier de 1973. La France y répond par le choix de la production nucléaire, associée à un grand réseau d'interconnexion à 400 kV, comportant des centrales de plus en plus puissantes et de longues antennes d'évacuation de l'énergie. Ce choix politique s'accompagne du recours à l'électricité pour des usages comme le chauffage, assurés jusqu'alors par des combustibles fossiles. Aussi, en dépit du ralentissement économique qui suit les "trente glorieuses", l'accroissement de la consommation d'électricité se poursuit.

Les grands chantiers constituent alors le décor principal de l'activité du contrôle électrique. Dès 1975, le métier effectue le bond majeur du passage de la technologie électromécanique à la technologie électronique, cette technologie étant d'abord limitée au niveau 400 kV, puis, à partir de 1985, étendue à tous les niveaux de tension. L'apprentissage de cette nouvelle technologie s'avère difficile et la maturité n'est atteinte qu'au début des années 1980. Les installations se normalisent alors sur l'ensemble du territoire, même si, en HT, les renouvellements d'installation restent effectués en palier électromécanique jusqu'en 1989.

A la fin des années 1980, l'utilisation de l'outil industriel qui a été créé prend le pas sur son développement et la qualité du produit électricité livré au client devient l'objectif majeur d'EDF. Les activités du métier contrôle électrique, recadrées vers la maintenance, sont alors plus structurées et uniformisées.

La quatrième partie, "**l'apprentissage du monde numérique**", de 1992 à 2006, comporte deux

périodes bien distinctes :

- Celle des dernières années du XX^{ème} siècle où pour EDF, après des certitudes, apparaissent les doutes et les craintes. Doutes qu'il va falloir exorciser par des politiques de sauvegarde du marché de la consommation intérieure et de recherche de relais de croissance : développement à l'international et développement à l'intérieur par élargissement de l'activité à la fourniture de services. Craintes devant l'ouverture du marché de l'électricité imposée par les directives européennes qui se traduisent par une succession de réformes de la direction Production-Transport d'EDF. Ces réformes ne trouvent leur aboutissement que par la loi de modernisation du secteur électrique, adoptée le 10 février 2000, par le parlement français qui tranche un débat qu'EDF n'a pas su résoudre.
- Celle de RTE à partir de 2000 où les anciennes équipes du Transport d'EDF retrouvent leur positionnement d'avant 1992 dans le réseau de transport où leur métier est légitimé.

L'ouverture des marchés de l'électricité impose à RTE, l'installation de systèmes de comptage aussi bien de la consommation que de la production dans des délais réduits. Les équipes du contrôle électrique sont alors très sollicitées aussi bien dans les phases de déploiement que de mise au point de ces systèmes de comptage. Pour le contrôle-commande, le cheminement vers la technologie numérique s'organise durant la période de 1992 à 2000, permettant à RTE de lancer dès 2001, les premières réalisations complètes de postes avec des équipements de contrôle-commande numériques, conduisant à la décision en 2006 de généraliser cette technologie pour le renouvellement des postes du réseau de transport. Le passage des activités de RTE sous assurance qualité constitue une des avancées dans les méthodes de travail de ses agents, en particulier de ceux du contrôle électrique.

A noter, pour le lecteur, qu'en règle générale, les derniers chapitres de chaque partie décrivent les grandes évolutions techniques, comme par exemple l'historique des plans de protection ou des grands projets qui ont jalonné ces années.

Il a donc fallu plus de quatre années à l'équipe pour mener à bien son projet : écrire un ouvrage respectant la méthodologie historique et qui ne soit pas exclusivement réservé aux initiés du contrôle électrique. Espérons que le pari est réussi et que les praticiens, les universitaires et les lecteurs intéressés par le sujet trouveront des réponses à leurs questions. Ce délai peut paraître élevé, mais il était nécessaire pour permettre à des acteurs de cette histoire de prendre le recul obligatoire et de s'aguerrir au métier d'historien. Il était également nécessaire à l'historien pour tenter d'appréhender les techniques du contrôle électrique. La recherche s'est déroulée dans des conditions satisfaisantes, nonobstant les difficultés propres à toute recherche historique, notamment la variété, l'inégalité et les manques des sources d'archives, et celles, plus spécifiques, liées au travail en équipe et à la rédaction collective. Pour les pallier, l'équipe s'est réunie physiquement une fois par trimestre et a utilisé la messagerie par Internet pour la mise au point de la rédaction. Il faut souligner qu'en dépit de sensibilités différentes, ce travail s'est déroulé dans une ambiance chaleureuse et studieuse. Tous les chapitres, chacun étant rédigé par un auteur propre, ont fait l'objet de discussions collectives, parfois vives et, même si l'auteur est resté libre de ses écrits, ils ont été validés après l'accord de l'équipe. Aussi, les membres de l'équipe se sentent-ils solidaires et responsables de l'ensemble des écrits de cet ouvrage.

L'équipe tient à remercier l'ensemble des personnes qui les ont soutenus et aidés tout au long de ces années et, plus particulièrement le Réseau de Transport d'Électricité (RTE) sans qui cette opération n'aurait pas été possible. S'il est impossible de les citer toutes nommément ici, nous tenons à remercier ceux qui nous ont accordé des entretiens, ceux qui nous ont apporté un témoignage écrit, ceux qui ont consacré du temps à la lecture des premiers jets ou à répondre à nos sollicitations et nos proches qui ont dû faire preuve de patience. Ce travail n'aurait jamais pu être mené à bien sans l'aide et la coopération active de Jean-Marie Benoît, de Patrick Assailly et de Thierry Hamet qui nous ont fourni la documentation de la période RTE ainsi que les remarques et la validation de nos textes. Enfin, nous remercions le centre des archives historiques EDF GDF de Blois, en particulier Philippe Dréano, qui nous a accueilli si souvent et a facilité nos recherches.

L'équipe remercie particulièrement Bernard Henry et Jean Roguin, qui ont eux-mêmes consacré une grande partie de leur carrière à EDF aux questions d'automatisation de la conduite des ouvrages du transport et du système électrique, d'avoir bien voulu accepter la lourde tâche de relecture de l'ensemble de l'ouvrage lors de sa mise en forme finale.

Table des matières

<i>Avant propos</i>	4
<i>Préface</i>	5
<i>Présentation de l'ouvrage</i>	6
Introduction générale	23
<i>1. La notion de système électrique</i>	23
1.1. La constitution d'un système électrique	23
1.2. Le système électrique français	24
1.3. L'Europe de la solidarité électrique	24
<i>2. L'exploitation du système électrique</i>	25
2.1. La sûreté du système électrique	25
2.2. La performance économique du système électrique	26
2.3. La qualité de l'électricité	26
2.4. Les aléas susceptibles d'affecter l'exploitation du système électrique	26
2.5. Les marges de sécurité	27
2.6. Les phénomènes à l'origine de la dégradation de la sûreté	28
2.7. La défense en profondeur	29
2.8. Les enjeux de l'ouverture du marché européen de l'électricité	29
<i>3. Les réseaux électriques</i>	30
3.1. Les différents types de réseaux	30
3.2. Les postes du réseau de transport	30
<i>4. Le contrôle électrique</i>	31
4.1. Les missions du contrôle électrique transport	31
4.2. Les équipements	32
4.3. Les activités	33
<i>5. Annexe : Quelques notions d'électrotechnique</i>	33
5.1. Tension alternative, courant alternatif	33
5.2. Notion d'impédance	33
5.3. Notion de puissance	34
5.4. Notion d'énergie	34
5.5. Un peu de vocabulaire	34

Première partie : 1946-1962 "Le temps des bâtisseurs"	36
Chapitre 1 : Le système électrique avant 1946	37
1. L'interconnexion du réseau de transport	38
1.1. Les premières grandes liaisons nationales	38
1.2. Les interconnexions internationales	39
2. L'exploitation des postes avant la nationalisation	40
3. Vers une organisation nationale des mouvements d'énergie	40
4. Les systèmes de contrôle électrique avant 1946	41
4.1. Les protections à sélectivité intrinsèque	42
4.2. Les protections de distance	42
4.3. Les automates de réenclenchement	43
4.4. Les comptages	43
5. L'organisation du contrôle électrique dans les anciennes sociétés	44
Chapitre 2 : Naissance d'une nouvelle industrie, le transport d'énergie électrique à distance	45
1. Les premières années de la nationalisation	45
2. La situation du réseau électrique jusqu'au début des années 1960	47
2.1. L'apparition et le développement du 380 kV	47
2.2. Les interconnexions internationales	48
2.3. Un esprit d'économie	48
3. L'exploitation et les besoins du réseau	49
3.1. Le développement des automatismes après la nationalisation	49
3.2. Regroupement et réorganisation des dispatchings	50
3.3. Le télé réglage	51
3.4. Du gardiennage à la télécommande des ouvrages de transport	53
4. Les installations de contrôle électrique	54
Chapitre 3 : L'organisation du contrôle électrique au sein du Transport	56
1. L'organisation d'EDF	56
2. Le service des Transports d'Energie (STE)	57
3. Une organisation qui cherche sa voie	58
3.1. L'organisation du contrôle électrique au niveau national	58
3.2. L'organisation régionale du contrôle électrique	60
4. Le contrôle électrique à la direction de l'Équipement	62
Chapitre 4 : La vie du contrôle électrique	63
1. Les activités	63
1.1. Activités de la division Contrôle électrique au niveau national	63
1.2. Activités d'un service régional Contrôle électrique	65
1.3. Activité des équipes Contrôle électrique des sous-groupes	67
2. Les effectifs et la vie des agents du Contrôle électrique	71
2.1. Les effectifs	72
2.2. La vie des agents dans les équipes	73

3. Relations extérieures	76
3.1. Participation aux commissions EDF.	76
3.2. Participation aux travaux des organisations nationales et internationales	76
3.3. Les relations avec les services d'EDF	76
3.4. Les relations avec les fournisseurs	78
4. La formation des agents	78
4.1. Stage de perfectionnement et de spécialisation complémentaire	78
4.2. Stage de perfectionnement des agents techniques du contrôle électrique	79
4.3. Les autres formations	81
5. La commission du contrôle électrique	81
5.1. Déroulement des réunions	81
5.2. Ordre du jour des réunions	82
5.3. Les comptes rendus	82
6. Les personnalités marquantes de la période	82
6.1. Léon Cabanes	82
6.2. Charles Dietsch	84
6.3. Léon Roche	85
Chapitre 5 : Les principes de la protection du réseau	86
1. Les caractéristiques du réseau	86
1.1. Rôle du réseau français de transport d'énergie.	86
1.2. Constitution du réseau de transport d'énergie.	86
1.3. Constitution des ouvrages protégés.	86
1.4. Mode de fonctionnement du réseau de transport	87
2. La qualité de service	87
2.1. Prévention des perturbations de fonctionnement	87
2.2. Dispositifs de protection contre les perturbations de fonctionnement et les situations anormales du réseau.	88
2.3. Reprise automatique du service	88
2.4. Coordination économique	88
2.5. L'adaptation des installations utilisatrices	88
2.6. Résultats obtenus sur les réseaux français de transport d'énergie	88
3. La protection contre les courts-circuits et les défauts d'isolement	89
3.1. Caractéristiques des défauts.	89
3.2. La politique du service du Transport d'Energie en matière de protection contre les défauts	90
3.3. La protection des lignes aériennes	90
3.4. L'expérimentation du disjoncteur shunt	94
3.5. La protection des câbles souterrains	95
3.6. La protection des transformateurs de puissance	95
3.7. La protection des jeux de barres	97
4. La protection contre les situations anormales d'éléments du réseau	97
4.2. La protection de surcharge des lignes	98

4.3. La protection des transformateurs contre les sur-échauffements	99
5. La protection contre les situations anormales du réseau	100
5.1. La limitation des reports de charge	100
5.2. Le délestage et l'ilotage des régions importantes	101
5.3. Le débouclage en cas de rupture de synchronisme	103
6. Les automates d'exploitation	104
6.1. Automate de réenclenchement associé à la protection contre les courts-circuits.	104
6.2. Automate à manque de tension	105
6.3. Autres automates	106
6.4. Régulateur de tension de transformateur	106
7. Les dispositifs de conduite des postes	107
7.1. Une automatisation poussée des opérations dans chaque poste.	107
7.2. Une standardisation des tableaux de commande des postes	107
7.3. Les infrastructures, les bâtiments	107
7.4. Une évolution technologique importante de la filerie et des équipements	108
7.5. L'enregistrement local des évènements	108
8. Les installations de comptage	111
8.1. Les comptages facturation	111
8.2. Les comptages distribution	112
8.3. Les comptages statistiques	112
8.4. L'étalonnage des compteurs	112
9. Information automatique des dispatchings	112
9.1. Télécommande	113
10. Les services auxiliaires des postes	113
10.1. Circuits à courant alternatif	113
10.2. Circuits à courant continu	114
11. Annexe 1 – Quelques éléments techniques complémentaires relatifs à la protection contre les défauts d'isolement	114
11.1. Caractéristiques générales des protections	114
11.2. La sélectivité entre protections	114
11.3. Les fonctionnements en secours	114
11.4. L'élimination séquentielle des défauts.	115
11.5. Le domaine de fonctionnement de la protection de distance RXAP	115
Conclusion de la période	117
1. Une phase d'harmonisation et d'optimisation	117
2. L'apparition de nouvelles problématiques	117
Deuxième partie : 1962-73 "L'apogée de la technologie électromécanique"	119
Chapitre 6 : L'évolution du réseau de transport et de son exploitation	120
1. L'évolution du parc de production	120
2. L'évolution du réseau de transport	120

2.1. Evolution de la structure du réseau	120
2.2. Les interconnexions internationales	122
2.3. Des éléments déterminants pour le contrôle électrique	122
3. L'évolution des politiques d'exploitation du réseau de transport	123
3.1. L'évolution de la conduite des postes	123
3.2. L'évolution de l'exploitation du réseau	124
4. Le retour d'expérience de l'exploitation, les incidents	124
4.1. Les résultats des statistiques d'incidents	125
4.2. Quelques incidents spectaculaires	125
5. Le rapport au client, la qualité du produit électricité	126
Chapitre 7 : L'organisation du contrôle électrique au sein du Transport	127
1. Une première tentative d'évolution du Transport en 1962	127
1.1. L'organisation et les missions du contrôle électrique	128
2. La création de la section d'essais Contrôle Electrique	129
3. La réorganisation du Transport en 1968	130
3.1. La création du centre d'Equipement du Réseau de Transport (1968)	131
3.2. L'évolution de l'organisation et des missions du contrôle électrique	132
3.3. La réforme du CRTT Paris (1970)	132
3.4. La disparition du CRTT Massif Central (1972)	133
4. La réforme des services centraux du Transport en 1973	134
4.1. La nouvelle organisation du contrôle électrique	136
Chapitre 8 : La démarche contrôle électrique	138
1. Des matériels spécifiques à EDF	138
1.1. Les protections de distance	138
1.2. Les protections dérivées	139
1.3. Les réenclencheurs	141
2. Premiers pas en électronique	141
2.1. Les capteurs générateurs d'impulsions	141
2.2. Une nouvelle protection contre la rupture de synchronisme	142
3. Les besoins du futur réseau d'interconnexion 400 kV	143
4. Premières réflexions sur un nouveau plan de protection	145
Chapitre 9 : La vie du contrôle électrique	146
1. Les activités du contrôle électrique	146
1.1. Au niveau national	146
1.2. En région	149
2. La population du contrôle électrique	150
2.1. Les effectifs	150
2.2. La vie des équipes	151
3. La sécurité, les risques du métier	151
4. Les outils, les méthodes de travail	153

4.1. Le calcul des courants de court-circuit	153
4.2. Les mises en service et le dépannage	153
5. <i>L'animation du métier</i>	154
5.1. L'animation nationale	154
5.2. L'animation régionale	154
6. <i>La formation des agents</i>	154
6.1. La formation au centre de Nanterre	154
6.2. Les autres formations	155
7. <i>Les relations extérieures</i>	155
7.1. Les services EDF	155
7.2. Les fournisseurs	155
7.3. Les clients	155
7.4. Les commissions nationales et internationales	156
8. <i>Les personnalités marquantes de la période</i>	156
8.1. Marcel Pétard	156
8.2. Benjamin Gaillet	157
8.3. Henri Chorel	157
Chapitre 10 : L'évolution de la technique	159
1. <i>L'émergence de la notion de plan de protection</i>	159
1.1. Le contexte	159
1.2. Le développement du réseau oblige à évoluer	159
1.3. Le "plan électromécanique"	162
1.4. La préparation de l'avenir	165
2. <i>Les équipements de contrôle électrique</i>	165
2.1. Les évolutions technologiques	165
2.2. Les équipements	166
3. <i>Les réducteurs de mesure et les systèmes de protection</i>	168
3.1. L'évolution des réducteurs destinés aux protections électromécaniques	168
3.2. Des réducteurs de mesure plus fidèles pour les protections électroniques	169
3.3. La protection des réducteurs de mesure et la sécurité des personnes et des matériels au niveau des circuits secondaires	169
4. <i>La mise en œuvre des équipements, les fileries</i>	170
4.1. Les infrastructures, les bâtiments	170
4.2. Les services auxiliaires	171
4.3. L'uniformisation de la filerie et des organes de sécurité et de consignation	172
4.4. Vers la filerie "Ariane" suite à la "brochure blanche"	172
4.5. Les installations de conduite locale	174
5. <i>Le comptage</i>	175
5.1. Les comptages facturation	175
5.2. Les comptages statistiques	175

6. Annexe 1 : Les protections de distance RXAP des séries 6000 et 7000 (CdC)	176
7. Annexe 2 : Les automates de reprise de service (ICE)	177
8. Annexe 3 : Evolution technologique et fiabilité des réducteurs de mesure	179
Conclusion de la période	180
Troisième partie : 1973-1992 "La mutation vers la technologie statique"	182
Chapitre 11 : L'évolution du réseau de transport et de son exploitation	184
1. Un réseau de transport fortement restructuré	184
1.1. Les nouvelles exigences du réseau issu du programme nucléaire	184
1.2. Les interconnexions internationales	188
1.3. De nouvelles structures et de nouvelles technologies	188
1.4. L'alimentation des grandes agglomérations	191
1.5. L'alimentation de la région parisienne	192
1.6. L'émergence des postes "d" en 1978	194
1.7. En conclusion	195
2. L'évolution des politiques d'exploitation du réseau de transport	196
2.1. L'évolution de la conduite des postes	196
2.2. L'évolution de l'exploitation du réseau	198
3. Les grands incidents de la période et le retour d'expérience	200
3.1. De grands incidents de réseau	200
3.2. Les résultats statistiques	202
3.3. A partir de 1985, des problèmes d'origine contrôle électrique, sur le 400 kV en particulier	203
4. Une nouvelle approche à la fin des années 1980, l'approche "système"	204
5. Vers un nouveau rapport au client, la qualité du produit électricité	206
5.1. Le Plan Pluriannuel d'Unité de Qualité de Service	206
5.2. Les coupures longues et les coupures brèves	206
Chapitre 12 L'organisation du métier contrôle électrique au transport	208
1. L'organisation nationale des années 1970	208
1.1. Le métier contrôle électrique au département Exploitation (DEX)	208
1.2. Le métier contrôle électrique au département Automatisation des Réseaux (DAR)	209
1.3. Le métier contrôle électrique au centre d'Équipement du Réseau de Transport (CERT)	209
2. L'organisation régionale des années 1970	210
2.1. Les CRTT hors le CRTT Paris	210
2.2. Le CRTT Paris	211
3. Les acteurs contrôle électrique extérieurs au service du Transport	211
3.1. La Direction des Études et Recherches	211
3.2. Le service des Mouvements d'Énergie	212
3.3. La Direction de la Production, la Direction de l'Équipement	212
3.4. La Direction de la Distribution	212
4. Les évolutions de l'organisation dans les années 80	213
4.2. Des ingénieurs BT dans les sous-groupes en 1985	215

4.3. Le centre de gravité du contrôle électrique dans les services centraux se déplace vers le DAR	215
5. Des fournisseurs plus nombreux	218
6. Vers le bouleversement de 1993	218
Chapitre 13 Une période de mutation, genèse du contrôle électrique contemporain	219
1. Le difficile déploiement du palier statique du plan THT 75	219
1.1. Le contexte initial du déploiement	219
1.2. Des difficultés dès les premières mises en service (1976)	221
1.3. La ré-industrialisation des équipements de 1977 à 1978	222
1.4. Le redémarrage en 1978 et le problème des "whiskers"	223
1.5. La maturité en 1982	224
2. Une nouvelle approche des plans de protection plus ouverte sur l'externe	225
2.1. De 1975 à 1980, les investigations pour de nouvelles solutions	225
2.2. Le plan 225 kV et HT finalisé en 1981, base de la nouvelle approche	225
2.3. Fin 83, le plan 225 kV et HT est déployé sur une partie limitée du réseau	226
2.4. L'application des principes du plan 225 kV et HT au plan THT 75	227
2.5. Le plan THT 86 et la généralisation du Daphné	227
3. Un long cheminement vers le contrôle-commande numérique	229
3.1. Les premières expériences autour d'une architecture centralisée	229
3.2. Fin des années 1970, vers l'architecture décentralisée à fibre optique	230
3.3. Les années 1980, le projet PANDOR	231
3.4. 1987, une numérisation en plusieurs étapes, SINAPSE étant la première	233
3.5. Le STET arrête en 1992 sa stratégie de numérisation	234
4. A partir de 1985, vers l'uniformisation, l'optimisation et l'informatisation des méthodes de travail	235
Chapitre 14 : La vie du contrôle électrique	237
1. La population contrôle électrique	237
1.1. Des effectifs en augmentation dans les sous-groupes	237
1.2. Vers la fin des spécificités régionales	239
1.3. La vie dans les équipes Contrôle Électrique	239
1.4. L'évolution des carrières dans le métier contrôle électrique	242
2. Les activités du contrôle électrique	243
2.1. Du référentiel fonctionnel à la solution normalisée	243
2.2. L'exercice de la responsabilité des installations contrôle électrique	246
2.3. Les travaux de plus en plus structurés	247
2.4. L'expertise électrotechnique	250
2.5. La professionnalisation du réglage des équipements, l'analyse des incidents	251
2.6. La maintenance, le dépannage	253
2.7. Les activités de laboratoire	254
2.8. L'évolution du "regard" sur les fausses manœuvres basse tension	256
3. La sécurité	256

4. L'évolution des outils	257
4.1. Les moyens de calcul des courants de défaut	257
4.2. Les outils de mise en service et de maintenance	257
4.3. Les outils du laboratoire de Saint Denis se numérisent	258
5. L'animation du métier contrôle électrique	258
5.1. L'animation nationale, les réunions de chefs de service Contrôle Électrique	259
5.2. L'animation régionale	259
6. La formation en contrôle électrique	259
6.1. La fin du centre de formation de Nanterre	260
6.2. Le centre de formation des Mureaux en 1981	261
6.3. L'évolution des stages de 1982 à 1992	262
6.4. Les autres actions de formation en contrôle électrique	263
6.5. Une professionnalisation croissante de la formation	264
7. Les missions à l'international	264
8. Les personnalités marquantes de la période	265
8.1. Claude Corroyer	265
8.2. Martial Masselot	265
Chapitre 15 : Les techniques contrôle électrique	266
1. Une prolifique production de référentiels fonctionnels et techniques	266
1.1. Le plan électromécanique	266
1.2. Le plan THT 75	266
1.3. Le plan 225 kV et HT	268
1.4. Le plan THT 83	270
1.5. Le plan THT 86	271
1.6. La brochure rouge définit les liaisons d'évacuation des centrales nucléaires	272
1.7. Le plan de découpage et de reprise de service	273
1.8. Les brochures verte, bleue, marron avec la Distribution	273
1.9. La brochure violette, cahier des charges de la partie conduite des installations de contrôle-commande	274
1.10. Les référentiels technologiques	275
2. Les équipements, protections, automatismes et autres	276
2.1. Les évolutions technologiques	276
2.2. Les protections contre les défauts d'isolement	276
2.3. La protection des barres	280
2.4. Les protections d'exploitation et de réseau	281
2.5. Les automatismes	281
2.6. Les téléactions	284
3. Les réducteurs de mesure et les systèmes de protection	284
3.1. Les réducteurs de mesure sur le réseau 400 kV	284
3.2. Les réducteurs de mesure sur les réseaux 225 kV, 90 kV et 63 kV	286
3.3. L'évolution des associations réducteurs protections	286

4. Les installations basse tension, infrastructures et fileries	286
4.1. Les infrastructures	287
4.2. Les services auxiliaires	288
4.3. La filerie Briséis	290
4.4. Les fileries Ariane, AB, ABS	293
4.5. La filerie Cynthia	293
4.6. La filerie Daphné	295
4.7. La cohabitation des fileries, les réalisations locales	296
4.8. La filerie Daphné "d" en collaboration avec la Direction de la Distribution	296
4.9. Les installations de conduite locale	297
5. Le comptage	299
5.1. Le palier 1984	299
5.2. Le comptage "90"	300
5.3. Le comptage postes sources	301
5.4. Le comptage des liaisons à courant continu	301
5.5. Qualimétrie	301
6. Annexe 1 : les réenclencheurs et automatismes de reprise de service électromécaniques ICE	302
Conclusion de la période	304
Quatrième partie : 1992-2006 "L'apprentissage du monde du numérique"	306
Chapitre 16 : La réforme de la DPT et la création du gestionnaire du réseau de transport	307
1. Une période défensive	307
1.1. La réforme de la DPT	307
1.2. La création du pôle SEPR	309
1.3. Le pôle Industrie	310
1.4. La relation "client - fournisseur"	310
2. La création de RTE : Une naissance très attendue	311
2.1. Une organisation centrée sur le métier	311
2.2. Renforcer les compétences de RTE pour gérer en toute indépendance le réseau de transport	313
2.3. Un acteur clé du nouveau marché de l'électricité	314
3. Les conséquences de la loi du 9 août 2004	316
3.1. Une évolution d'entreprise préparée de longue date	316
3.2. La neutralité de la nouvelle société	316
3.3. Plusieurs dispositions garantissent l'indépendance des dirigeants de l'entreprise	316
3.4. Transfert des contrats	317
3.5. Le directoire et les organes dirigeants	317
Chapitre 17 : Les évolutions et l'exploitation du réseau de transport	318
1. Les évolutions du réseau électrique	318
1.1. La construction de nouvelles lignes	318
1.2. Des solutions palliatives à rechercher	320
1.3. La concertation à la base de tous les projets	321

1.4. Quelques échecs lourds de conséquences	321
2. La sécurisation du réseau	322
3. Les fibres optiques pour des télécommunications sécurisées	322
3.1. L'incident du 6 Mars 2004 en Vallée du Rhône	322
3.2. Le projet Rose	322
4. L'exploitation du réseau	323
4.1. Un nouveau système de conduite et de surveillance des ouvrages du réseau de transport	324
4.2. Les événements marquants de l'exploitation	324
4.3. La qualité de l'électricité	325
4.4. La qualité : une démarche au service des clients	326
4.5. Une maintenance et une exploitation optimisées	327
Chapitre 18 : La vie du contrôle électrique	328
1. L'organisation du contrôle électrique à la DEPT	328
1.1. Le niveau national	328
1.2. Le contrôle électrique dans les régions	329
1.3. Conséquences pour le contrôle électrique	330
2. La mise en place des équipes du contrôle-commande à RTE	330
3. Les effectifs	332
3.1. La période 1993-2000	332
3.2. Les effectifs à RTE	332
4. Le contrôle électrique du niveau national	335
4.1. Les projets nationaux	335
4.2. Les missions nationales	335
5. Missions régionales du contrôle électrique	336
5.1. L'entité contrôle électrique d'un GESCC	336
5.2. L'entité d'ingénierie du contrôle-commande	337
5.3. Le contrôle électrique en GET	337
6. L'animation du métier	337
6.1. La création des GAN et des GAR	338
6.2. L'animation du contrôle-commande à RTE	339
7. Formation	342
7.1. Stages de base au contrôle électrique	342
7.2. Stages pour le contrôle-commande numérique	343
8. Démarches d'assurance qualité	344
8.1. Les démarches du pôle SEPR	344
8.2. La certification de RTE	344
9. Le patrimoine contrôle-commande	345
9.1. Les objectifs de la mission	345
9.2. Résultats pour le domaine des ouvrages du contrôle commande	346
10. Les relations avec les services d'EDF	346

10.1. La Distribution	346
10.2. Les producteurs	346
10.3. La Direction de l'Équipement	347
Chapitre 19 : L'exploitation et la maintenance	348
1. Les systèmes de protections	348
1.1. La nouvelle version 1997 du plan de protection 400 kV	348
1.2. Cas particuliers	353
1.3. Le plan de protection pour les réseaux 225 kV et HT	354
1.4. Le contexte des années 2000	354
1.5. Qualification des équipements	354
2. La maintenance des systèmes de contrôle-commande des postes	355
2.1. L'organisation de la maintenance BT	355
2.2. Les niveaux de maintenance à RTE	357
2.3. Les directives de maintenance BT	358
2.4. Modifications en exploitation	360
2.5. Le comportement des matériels en exploitation et responsabilisation des unités	361
2.6. Rôle de l'ingénieur fonctionnement électrotechnique	363
3. Les incidents marquants de la période	363
3.1. Les problèmes de protections différentielles de barres	363
3.2. La fiabilisation des protections DIF B	364
3.3. Les problèmes de protections différentielles de ligne	364
3.4. Les problèmes de protections différentielles de câble	365
3.5. Incidents sur le réseau électrique	365
4. Mise à niveau des équipements du plan 75	366
4.1. Historique	366
4.2. Premier bilan	368
5. Le passage de l'an 2000	369
5.1. Recensement des applications	369
5.2. Une organisation nationale	369
5.3. Des résultats rassurants	369
5.4. Un passage de l'an 2000 calme	370
Chapitre 20 : Les développements et l'ingénierie	371
1. Renouvellement des équipements de contrôle-commande des postes	371
1.1. Les solutions techniques de renouvellement.	372
1.2. La politique du renouvellement pour le réseau 400 kV	372
1.3. La politique du renouvellement des équipements électromécaniques	374
2. Numérisation du contrôle-commande des postes	376
2.1. Le projet de nouveau calculateur de poste	376
2.2. La tranche numérique Électre	377
2.3. Architecture Électre d'Aréva	380

2.4. La configuration d'un système Électre.	382
2.5. L'architecture Électre Siemens	383
2.6. Le contrôle-commande numérique pour les postes HTB/HTA	383
2.7. Des " parasites non prévus "	384
3. La problématique des mises en service	384
3.1. Rappels historiques	384
3.2. Les mises en service optimisées à RTE	386
4. La politique industrielle et les relations avec les fournisseurs	386
4.1. Les spécificités du numérique	386
4.2. Les spécificités des protections de distance numériques	386
4.3. Cas du contrôle-commande numérique	387
5. Les automates de zone	388
5.1. Automate de St Vulbas	388
5.2. Automates de la vallée du Rhône	389
5.3. Fiabilité des automates	390
6. Les systèmes de comptage	391
6.1. Le projet de télérelève des énergies produites (TEP)	392
6.2. Le projet de télérelève des énergies consommées (TEC)	397
6.3. L'étalonnage des compteurs	398
6.4. La modification en exploitation des compteurs Chauvin Arnoux	399
6.5. Les nouvelles armoires de comptage.	399
6.6. Le calcul des pertes et les formules de décomptes	400
6.7. Les délais d'interventions et les missions des cellules comptage	400
6.8. Les conférences et symposiums	400
6.9. Le projet inter-URSE	401
6.10. Le référentiel technique "comptage"	401
6.11. La maintenance du système de comptage	401
6.12. Les conséquences sur le calcul des pertes.	402
6.13. L'ingénierie des compteurs	403
6.14. Les projets	403
6.15. Conclusion	405
7. Les projets avec la Direction des Études et Recherches	405
7.1. Le projet SEPT	406
7.2. Le projet qualimètre	406
7.3. Les modèles numériques de simulation de réseau	407
7.4. Le plan de défense du réseau	407
Conclusion de la période	411
1. Le défi technologique	411
2. Le défi électrotechnique	411
Épilogue	412

<i>L'espace ESCONCE</i>	418
<i>Éléments de bibliographie</i>	425
2.1. Ouvrages généraux	425
2.2. Economie publique	425
2.3. Economie électrique	425
2.4. Le contrôle-commande à EDF et avant la nationalisation (Publications)	426
2.5. Sources	431
<i>Glossaire</i>	433
<i>Liste des figures</i>	436
<i>Principaux sigles utilisés</i>	445
<i>Index des noms propres</i>	447

Introduction générale

"Un grand réseau de distribution peut être comparé à un système composé de deux réseaux, l'un transmettant l'intelligence, l'autre transmettant la puissance [...] On ne pourra pas exploiter d'une façon satisfaisante le réseau de puissance, si l'on ne peut d'abord exploiter le réseau de l'intelligence."

C. E. Bennett, rapport CIGRÉ, 1923¹³

1. La notion de système électrique

Dans la vie courante, en rentrant chez soi, il suffit d'appuyer sur un interrupteur et l'énergie est là instantanément : délais de transport et délais de commande sont absolument nuls. Cette situation est due au fait que l'énergie électrique se communique sans transport simultané de matière. Cette absence de matière à transporter conduit, au moins jusqu'à aujourd'hui, à l'impossibilité de stocker à des coûts raisonnables l'énergie électrique. Ainsi, a priori, il n'est pas possible d'absorber dans le temps les variations de consommation que la production ne pourrait pas suivre. Paradoxe du bien de consommation le moins stockable et pourtant le plus souple d'emploi !

1.1. La constitution d'un système électrique

A l'échelle d'une région, d'un pays ou de plusieurs pays, un système électrique est constitué par :

- Un parc de production composé de différents "groupes de production" : hydrauliques, thermiques classiques ou nucléaires, éoliens ou même des panneaux photovoltaïques... Ces groupes sont eux-mêmes des ensembles complexes de plus ou moins gros matériels de puissance mais, aussi, d'organes de protections et de régulations.

Qu'est ce qu'un groupe de production ?

L'électricité est produite dans des usines spécialisées, les "centrales électriques", par des machines particulières, les "alternateurs". Un alternateur produit de l'électricité lorsque sa partie tournante, (le "rotor") est maintenue en rotation, l'énergie mécanique nécessaire pouvant provenir de différentes sources, par exemple :

- une turbine hydraulique, actionnée par une chute d'eau ou bien le courant d'une rivière (c'est le cas des premières centrales à la fin du XIX^{ème} siècle)
- une turbine thermique, actionnée par la vapeur sous pression issue d'une chaudière, elle-même chauffée grâce au charbon, au fuel, ou à l'énergie nucléaire
- un moteur thermique, utilisant le gazole comme combustible

L'ensemble alternateur – dispositif de maintien en rotation s'appelle "groupe de production".

Dans tous les cas, de telles centrales nécessitent de l'eau, soit pour en utiliser directement la force mécanique (groupes hydrauliques), soit pour assurer le refroidissement du dispositif qui fait tourner l'alternateur (groupes thermiques, groupes nucléaires). Plus le groupe est puissant, plus la quantité d'eau nécessaire est importante. En France, les centrales hydrauliques sont ainsi installées dans les Alpes, les Pyrénées, le Massif Central, les centrales thermiques ou nucléaires se trouvent sur les rivières, les grands fleuves et en bord de mer.

Les groupes de production utilisant l'énergie du vent ou du soleil se sont développés plus récemment : on parle de « ferme éolienne » ou de « centrales solaires ». Leur puissance unitaire est plus faible que celle des centrales classiques. Pour le solaire photovoltaïque, il s'agit d'une conversion directe (sans alternateur) du rayonnement solaire en électricité.

- Des kilomètres de lignes aériennes ou de câbles souterrains ainsi que des postes électriques formant un "réseau électrique" qui, lorsqu'il est relativement dense, permet des transits de puissance importants. Aux matériels de puissance (lignes, transformateurs, organes de coupure, ...) qui constituent ces ouvrages sont associés un grand nombre de dispositifs de protections et d'automatismes qui permettent d'obtenir un fonctionnement correct du réseau en toutes circonstances.

Qu'est ce qu'un réseau électrique ?

Un réseau électrique est un ensemble de "postes électriques" reliés par des "lignes électriques".

Chaque poste électrique est un nœud du réseau, il peut être connecté à un nombre plus ou moins important de lignes en fonction de la structure du réseau. Son alimentation est ainsi sécurisée car réalisée par plusieurs lignes et il constitue lui-même une source pour alimenter d'autres installations électriques.

Les lignes électriques sont les branches du réseau, elles assurent la circulation de l'électricité d'un poste à l'autre. Le terme générique de "ligne" désigne soit une ligne aérienne composée de conducteurs portés par des pylônes, soit un câble souterrain dont les conducteurs sont enfouis dans le sol.

¹³ C. E. Bennett était ingénieur en chef adjoint d'Ebro Irrigation and Power.

A chaque instant, les différents groupes de production injectent de l'énergie sur le réseau et celui-ci permet la répartition de cette énergie entre les différentes consommations en fonction de la demande.

Le réseau électrique est constitué de plusieurs "sous-réseaux" fonctionnant à des tensions différentes (en France 400 kV, 225 kV, 90 kV, 63 kV). Les sous-réseaux sont électriquement reliés entre eux au moyen de transformateurs, installés dans les postes. Les transformateurs permettent de transmettre de la puissance entre deux niveaux de tension différents.

- Les nombreuses installations de clients, directement raccordées sur les réseaux à haute tension, ou alimentées par des réseaux de tensions inférieures, comme ceux de la distribution d'électricité, reliés à ces mêmes réseaux.
- Un centre national et des centres régionaux de conduite exploitant, chacun dans sa zone d'action et conformément à ses responsabilités, le système électrique. Outre les interventions des opérateurs, des régulations centralisées sont mises en œuvre pour régler la fréquence et les échanges avec les gestionnaires de réseaux de transport voisins, ainsi que la tension sur des zones plus ou moins vastes.

Ces multiples composants sont en interaction permanente, sous le contrôle d'opérateurs humains, de protections et d'automatismes, ils constituent un ensemble complexe et fortement bouclé qui doit être conçu et exploité de manière cohérente : **c'est la dimension Système.**

1.2. Le système électrique français

En 2006, le système électrique français est un ensemble qui délivre à la pointe une puissance supérieure à 80.000 MW. Il comprend :

- Un parc de production de plus de 100.000 MW (somme des puissances des groupes de production),
- Une centaine de milliers de kilomètres de lignes aériennes ou de câbles souterrains et plusieurs milliers de postes électriques,
- Plusieurs milliers d'installations de clients,
- Un centre national de conduite (CNES) et sept centres régionaux de conduite (URSE).

1.3. L'Europe de la solidarité électrique¹⁴

Le Système français fait partie du système européen "interconnecté" (les réseaux des différents pays sont connectés entre eux). La sécurité d'approvisionnement et la solidarité entre pays, grâce à une qualité d'alimentation supérieure garantie par un "grand réseau" et à la mutualisation des "réserves" (productions disponibles en cas d'incident grave), ont rassemblé les Européens.

De fait, l'Europe de la solidarité électrique est le résultat d'efforts engagés depuis plusieurs décennies. Elle a en effet commencé à se construire sur des accords techniques, de manière pragmatique, bien avant le lancement d'une politique énergétique européenne. Ainsi, pour la France, la coopération avec les pays voisins a débuté dès 1920, pour tirer profit notamment de l'énergie hydroélectrique suisse et améliorer la sécurité du système électrique en développement. Après la seconde guerre mondiale, cette coopération s'est renforcée, pour aboutir en 1951, soit au tout début de la construction européenne, à la création de l'Union pour la Coordination de la Production et du Transport d'Electricité (UCPTE), véritable outil de concertation chargé d'établir les règles techniques de fonctionnement du système électrique interconnecté afin de renforcer sa sécurité.

L'interconnexion du système électrique français avec les pays d'Europe de l'Ouest

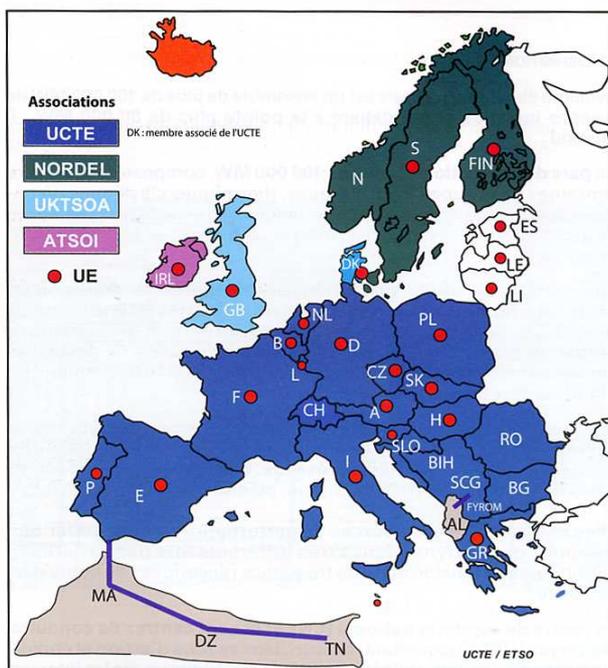


Figure 01 : L'interconnexion du système électrique français avec l'Europe de l'Ouest

¹⁴ Voir : Rencontre sur les réalités européennes Mouvement européen : « L'Europe de l'électricité existe-t-elle ? » Intervention de Dominique Maillard.

Au cours des cinquante dernières années, une zone "synchrone", c'est à dire dans laquelle tous les groupes de production tournent à la même vitesse, s'est construite en Europe grâce à la construction de lignes d'interconnexion entre pays. Dans cette zone, si une machine s'arrête, les autres compensent ce déficit de production. Ainsi, plus les membres dans la "zone synchrone" sont nombreux et moins l'effort de compensation à fournir est important. Aujourd'hui la zone synchrone européenne est la plus étendue au monde, avec trente pays connectés, et s'étend de l'Europe au sud de la Méditerranée.

Deux caractéristiques essentielles de ce système doivent être prises en compte vis-à-vis de son bon fonctionnement dont une des composantes est la sûreté¹⁵ :

D'une part, le fait que le système soit fortement "maillé" (le réseau comporte de nombreuses lignes) a pour conséquence qu'une perturbation importante, quelle que soit sa localisation, risque de se propager à l'ensemble du Système (cf. panne européenne du 4 novembre 2006). A contrario, le secours mutuel entre systèmes a pour objectif de les éviter. Il peut aussi en minimiser les conséquences comme ce fut le cas le 4 novembre 2006, grâce à la mise en œuvre simultanée de délestages dans plusieurs pays européens et la compensation par les groupes hydrauliques français de la perte de puissance consécutive au déclenchement des éoliennes en Allemagne.

- D'autre part, les constantes de temps qui sont en jeu couvrent des échelles de temps très diverses. Ainsi, les perturbations de l'onde électrique résultant des courts-circuits se propagent à des vitesses proches de celle de la lumière, les automates ou protections travaillent dans des domaines allant de la dizaine de millisecondes à quelques secondes, et certaines régulations pilotent des processus ayant des constantes de temps de plusieurs minutes voire de plusieurs heures. L'équilibre du Système repose donc sur une parfaite coordination de l'ensemble des dispositifs de régulation et de protection.

Il en résulte que tout mauvais comportement d'un composant, même très localisé, peut briser cet équilibre, rejaillir très vite et très loin et affecter globalement le fonctionnement de l'ensemble.

2. L'exploitation du système électrique

L'exploitation du système électrique doit permettre de maîtriser simultanément trois objectifs : la sûreté, la performance économique et la qualité de l'électricité.

En France, cette mission de service public, assurée pendant plus de cinquante ans par EDF, est aujourd'hui confiée au gestionnaire du réseau de transport d'électricité (GRT). Elle s'accompagne d'obligations qui sont définies par la loi¹⁶ :

"Le gestionnaire du réseau public de transport assure à tout instant l'équilibre des flux d'électricité sur le réseau, ainsi que la sécurité, la sûreté et l'efficacité de ce réseau, en tenant compte des contraintes techniques pesant sur celui-ci. Il veille également au respect des règles relatives à l'interconnexion des différents réseaux nationaux de transport d'électricité. [...]"

2.1. La sûreté du système électrique

La place de plus en plus importante de l'électricité dans la vie courante de notre société a pour corollaire, que les interruptions de fourniture ont des impacts croissants avec la durée et l'étendue géographique des coupures. Le spectre des conséquences est large, depuis la gêne locale jusqu'à la paralysie de l'activité sur de larges zones.

La notion de sûreté de fonctionnement a été introduite d'abord dans le domaine militaire au cours des années 1940 et les méthodes d'étude de la sûreté se sont ensuite développées successivement au cours des années 1960 et 1970 dans l'aéronautique, le nucléaire et les transports terrestres.

La sûreté de fonctionnement du système électrique peut être définie comme la maîtrise de l'évolution et des réactions du système électrique face aux différents aléas dont il est l'objet (courts-circuits, évolution imprévue de la consommation, indisponibilités fortuites d'ouvrages de production ou de transport, ...). En pratique, il s'agit de l'aptitude à :

- assurer le fonctionnement normal du système électrique ;
- limiter le nombre d'incidents et éviter les grands incidents ;
- limiter les conséquences des grands incidents lorsqu'ils se produisent.

Une telle définition pousse à définir les conséquences inacceptables des incidents, à identifier les événements initiateurs et à définir des parades permettant de limiter les risques.

¹⁵ Définie précisément au paragraphe 2.1

¹⁶ Loi n° 2000-108 du 10 février 2000 relative à la modernisation et au développement du service public de l'électricité, article 15.