

INSERTION DE LA PRODUCTION DECENTRALISEE EN BT

**Pierre LEMERLE, Damian CORTINAS,
Sylvain VITET, Jean-Louis MEYER**
Electricité de France -
Direction des Etudes et Recherches
1, Avenue du Général de Gaulle – 92141 CLAMART
Tél. : +1 47 65 43 21 - Fax : + 1 47 65 41 76
e-mail : pierre.lemerle@edfgdf.fr

Jean-Luc FRAISSE
Electricité de France - EDF GDF SERVICES
17, place des Reflets
92080 PARIS LA DEFENSE
Tél. : +1 49 02 70 29 - Fax : +1 49 02 50 91
e-mail : jean-luc.fraisse@edfgdf.fr

1. INTRODUCTION

EDF a vu, lors des cinq dernières années, un accroissement important du nombre d'unités de production raccordées aux réseaux MT. Cette évolution peut être principalement attribuée au développement des groupes diesels de pointe puis, plus récemment, à celui des installations de cogénération industrielles et résidentielles. On peut encore s'attendre dans les années à venir à de nouvelles évolutions du marché de la production décentralisée, parmi lesquelles l'émergence d'une offre industrielle d'unités destinées aux réseaux BT.

Tout comme les réseaux MT, les réseaux BT n'ont pas été dimensionnés pour accueillir de la production décentralisée. Un certain nombre de problèmes techniques se posent donc lors du raccordement d'unités à ces réseaux : contraintes sur la sécurité des biens et personnes, sur le fonctionnement et l'exploitation du réseau ainsi que sur la qualité de service et de fourniture offerte aux usagers.

Jusqu'à maintenant, la marginalité (en nombre et en puissance unitaire) des unités raccordées en BT a permis la mise en œuvre de solutions techniques simples et la définition de règles de raccordement similaires à celles appliquées en MT. Une pénétration importante associée à l'émergence de nouveaux types de moyens de production oblige cependant à une analyse plus fine des contraintes. Pour les réseaux français, les problèmes étant apparus comme les plus délicats sont : tenue de la tension en BT, impact sur les plans de protection BT, dispositions spéciales pour l'exploitation des réseaux, la surveillance et le contrôle des unités. Si de gros volumes de production sont raccordés sur plusieurs réseaux BT d'une même zone, il convient également d'examiner les conséquences sur la tenue de tension MT, le plan de protection MT, voire la tenue des matériels MT à la Pcc.

2. TYPOLOGIE DES INSTALLATIONS RACCORDEES

2.1 Situation actuelle et perspectives pour les années à venir

Conçus dans une optique de distribution de l'électricité aux clients, les réseaux BT français accueillent actuellement un faible nombre d'unités électrogènes. Jusque dans les années 90, la majorité des installations raccordées sont hydrauliques au fil de l'eau ou sur petite chute. Pour minimiser les coûts et maximiser la fiabilité des installations, la préférence des autoproducteurs va alors pour des machines de type asynchrone.

Le milieu des années 90 voit le développement important des groupes diesels de pointe et de la cogénération, essentiellement sur les réseaux MT et HTB. A contrario, l'implantation de nouvelles unités de production en BT reste marginale. Ceci s'explique en partie par la limitation à 215 kW du tarif d'achat cogénération et des rendements électriques moindres pour les installations de faible puissance. Les nouvelles installations de production raccordées sont alors essentiellement constituées par des machines synchrones. Quelques dispositifs photovoltaïques de très faible puissance raccordés par une interface électronique apparaissent également en BT.

Les années à venir risquent d'être marquées par des avancées technologiques significatives dans la production électrogène de faible puissance. Plusieurs modèles de microturbines sont déjà proposés pour des applications électrogènes pures ou des installations de cogénération. D'autres types de moyens de production auront probablement dans les années à venir un niveau de maturité suffisant pour pénétrer le marché : piles à combustibles, moteurs à piston, moteurs Stirling, installations éoliennes ou photovoltaïques...Les prévisions de développement sont difficiles à établir à l'heure actuelle.

2.2 Caractéristiques des moyens de production émergents

Il est intéressant de relever quelques constantes techniques parmi l'ensemble des moyens de production pouvant émerger sur les réseaux BT. Leur gamme de puissance s'étale de quelques dizaines à quelques centaines de kW. Les produits bénéficient de technologies de pointes issues d'autres milieux industriels (armement, électronique, automobile...).

D'un point de vue électrique, le recours à un convertisseur de puissance pour le raccordement au réseau est également fréquent. Celui-ci assure la conversion continu-alternatif nécessaire pour les moyens de stockage ou production électrochimiques ou permet d'optimiser le rendement de la machine d'entraînement en amont de la génératrice électrique (microturbine, éoliennes). La figure 1 montre des exemples de structure de interface électrique de raccordement au réseau d'une microturbine et d'une pile à combustible.

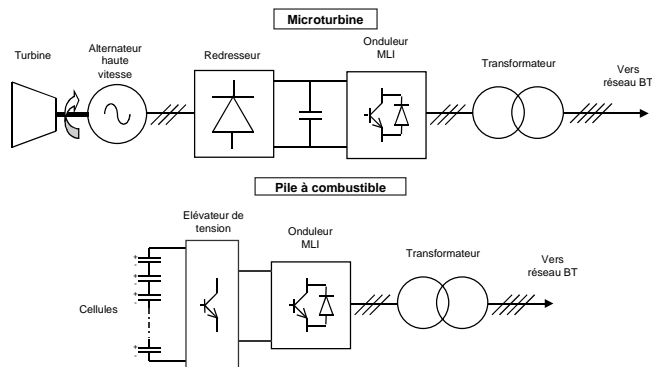


Figure 1. Structure générale de microturbine et de pile à combustible

Les convertisseurs de puissance présentent par rapport à des machines tournantes classiques des caractéristiques spécifiques dont il est nécessaire de tenir compte lors de l'étude et la mise en œuvre des raccordement :

- présence fréquente d'un transformateur de raccordement,
- couplage électronique au réseau,
- possibilité d'injection ou d'absorption de puissance réactive,
- émission de courants harmoniques basse ou haute fréquence,
- comportement sur perturbation réseau (court-circuit, dérive de tension ou fréquence) difficile à modéliser.

3. REGLEMENTATION ACTUELLE

La réglementation technique relative aux conditions de raccordement aux réseaux BT et actuellement en vigueur a été établie dans le cadre d'un groupe de travail. Celui-ci est composé de représentants des principaux acteurs du marché français de l'électricité et placé sous la tutelle du Ministère

de l'Industrie. Ses travaux ont permis d'aboutir à la rédaction d'un arrêté ministériel relatif aux conditions techniques de raccordement des installations de moins de 1 MW [1].

Ce texte indique que la puissance maximale unitaire d'une installation de production susceptible d'être connectée en B.T. est de 250 kVA, sous réserve de la capacité d'accueil du réseau B.T. Cette dernière est à déterminer en fonction d'un ensemble de conditions techniques portant sur les points suivants :

- tenue thermique des ouvrages
- tenue de la tension et gestion de la puissance réactive
- télécommande 175 Hz et filtrage 175 Hz
- protections de découplage
- mise à la terre des neutres et des masses
- couplage au réseau
- comptage.

L'analyse ayant conduit à cette réglementation actuelle doit maintenant être prolongée. Certains points relatifs au fonctionnement et à l'exploitation des réseaux BT ont été partiellement traités ou non abordés : plan de protection, régime de neutre des machines, architecture des branchements, consignes d'exploitation, observabilité des installations.

La réflexion a été menée sur l'hypothèse de l'insertion de machines tournantes, en nombre limité et d'une puissance marginale par rapport à la capacité des ouvrages BT. Il est nécessaire d'envisager une pénétration importante de moyens de production en BT et l'émergence de type de machines dont le comportement est mal connu. Le raccordement d'installations monophasées doit également être abordé. Enfin, il est nécessaire de ne pas mésestimer l'interaction entre les machines raccordées en BT et les réseaux MT.

4. CONTRAINTES DE FONCTIONNEMENT

4.1 Tenue de tension en BT et en MT

Le problème de la tenue de tension en présence de producteurs raccordés aux réseaux BT est de tout premier ordre. L'exploitant est légalement tenu de garantir une tension de 230 V +6%/-10% (moyennés 10 minutes) à tout client alimenté en BT. Les variations de tension sur le réseau MT doivent également être aussi limitées que possible de façon à maintenir la tension de fourniture d'un client MT dans une fourchette de $\pm 5\%$ autour d'une tension contractuelle de référence.

Les ouvrages de production connectés au réseau BT, peuvent livrer de façon permanente ou temporaire de l'énergie à ce réseau. Inversement, le client producteur peut, à certains moments, être consommateur. Le choix entre ces modes de fonctionnement dépend de l'approche

économique effectuée pour le moyen de production d'électricité et éventuellement de chaleur. Cette approche prend en compte les prix du gaz, d'achat et de vente de l'électricité, ainsi que les besoins propres du client producteur.

Le profil de tension sur un départ BT dépend du bilan entre la puissance appelée ou livrée au réseau par le client producteur et l'état de charge des autres clients. En absence de producteur, le réglage et les caractéristiques du réseau sont définis pour respecter les limites réglementaires de variation de tension. Pour ce faire, on considère les périodes de charge maximale et minimale. En présence d'une installation de production, on est confronté au problème de la détermination des nouveaux niveaux de charges maximales et minimales résultant de la superposition des courbes de production et de consommation. Si la nouvelle valeur de charge minimale est inférieure à l'ancienne, les conditions de réglage de la tension en présence du producteur sont plus difficiles qu'en son absence.

L'évaluation des niveaux de tension est d'autant plus difficile qu'en absence d'installations de production, le déséquilibre de charge sur un départ BT peut créer des profils de tension plus élevés dans des conditions de charge moyenne ou forte plutôt que de charge minimale. A titre illustratif, la figure 2 donne les trois tensions simples en extrémité d'un départ BT, en fonction de la puissance totale appelée par ce départ. La répartition des charges entre les 3 phases est supposée constante quelle que soit la charge du départ : 60% sur la phase a, 20% sur la phase b et 20% sur la phase c. A charge maximale, la tension sur la phase b est égale à 243 V au lieu de 220 V si le réseau était équilibré. On remarque également que malgré la charge du réseau, une des trois tensions en extrémité de départ peut être supérieure à la tension directement en sortie du transformateur MT/BT.

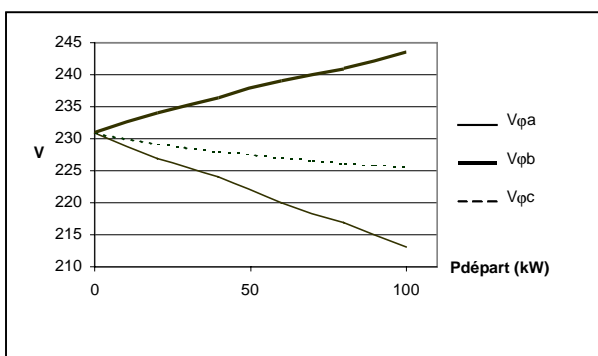


Figure 2. Evolution des trois tensions de phase en bout de départ BT en fonction de la puissance totale appelée

Une autre difficulté vient du manque de connaissance de la répartition des charges entre les trois phases du réseau, à différentes périodes de la journée et de l'année. Enfin, le nombre de clients raccordés sur un départ BT pouvant être

faible, le recours à une modélisation statistique des charges peut engendrer des erreurs importantes sur l'évaluation des niveaux de tension sur le réseau BT.

Deux dispositions réglementaires ont été adoptées pour limiter le risque de surtensions :

- possibilité d'abaisser le $\tan\phi$ jusqu'à 0. L'effet de cette mesure est limité car, du fait de fort ratio R/X des réseaux BT (entre 1 et 3 pour les conducteurs aériens et entre 1 et 6 pour les câbles), les variations de tension proviennent principalement des transits de puissance active
- obligation d'un raccordement sur un départ dédié si la puissance de l'installation est supérieure à 40% de la puissance du transformateur MT/BT. Le problème du surcoût de raccordement est alors posé.

Une autre disposition permettant de limiter fortement l'impact sur les niveaux de tension BT serait la diminution temporaire de la puissance active fournie au réseau. Des aménagements aux contrats d'achat seraient alors à définir.

Des solutions plus efficaces peuvent être envisagées pour les installations raccordées par convertisseurs de puissance qui autorisent des plages de variation importantes de la puissance réactive fournie et absorbée. On peut ainsi rajouter des boucles de limitation de la puissance réactive en cas de dépassement des niveaux admissibles de tension voire réguler directement la tension au point de raccordement. Si la régulation de tension est suffisamment performante (large plage de fourniture et d'absorption de réactif et contrôle monophasé du convertisseur), on peut également envisager de faire contribuer l'unité de production au soutien de la tension et à la compensation du déséquilibre.

Si le raccordement d'une unique installation de production sur un réseau BT pose un problème local de réglage de la tension (sur un départ BT), il n'en est plus de même en présence d'un nombre important d'unités raccordées à plusieurs réseaux BT desservis eux-mêmes par un même départ MT. Des études récentes ont montré que l'étude des contraintes de tension posées par la production raccordées en MT nécessitent un calcul de l'état du réseau en période de pointe et en période creuse. Les points d'injection de puissance en BT modifient nécessairement les niveaux de charge du réseau MT et modifient de fait les niveaux de tension sur l'ensemble du départ MT et des réseaux BT desservis par ce départ MT.

En conclusion, le raccordement des installations de production en BT peut engendrer des difficultés pour maîtriser les profils de tension en BT voire en MT. Les enjeux pour le distributeur sont importants du fait de ses obligations vis à vis des clients et en raison des volumes d'investissements que représentent les renforcements de réseau.

4.2 Déséquilibre et gestion des neutres

La réglementation actuelle ne fait état d'aucune obligation de la part du producteur sur la gestion du neutre de son installation de production.

Le couplage du neutre d'une installation ou de son transformateur au neutre du réseau BT aurait comme avantage immédiat de limiter l'effet de cette dernière sur les niveaux de tension par une réduction significative du déséquilibre de tension. A titre illustratif, la figure 3 donne l'évolution des trois tensions de phases au point de raccordement d'un producteur en fonction de la puissance qu'il délivre au réseau. Le producteur est situé environ au milieu d'un départ BT. Les premier et deuxième jeux de courbes correspondent aux cas où le neutre de son transformateur d'évacuation est respectivement couplé et découplé du neutre du réseau. On remarque que lorsque le producteur est couplé au réseau sans débiter de puissance sur celui-ci, on passe d'un écart maximal entre les trois tensions de phases de 24 V avec le neutre découplé à 10 V avec le neutre couplé, soit un gain de 14 V sur le déséquilibre entre les tensions phase-neutre. Un autre atout de la création et du couplage d'un point neutre en sortie d'installation est une meilleure maîtrise des surtensions de défaut lorsque le producteur est lié ou isolé du transformateur du poste MT/BT.

Le choix du régime de neutre des installations est en réalité un problème général pour lequel il est nécessaire de tenir compte des performances du plan de protection, de la sécurité des biens et personnes, de la qualité de la forme d'onde et des contraintes sur le matériel du producteur et en réseau (par exemple en raison de la circulation possible d'harmoniques de rang 3 dans le neutre). Une étude est actuellement en cours pour établir des préconisations.

4.3 Plan de protection

Le plan de protection BT contre les défauts entre phases ou phase-neutre est assuré par des fusibles. Son principe repose sur l'élimination du défaut par fusion du(des) fusible(s) sur la(les) conducteurs en court-circuit, la coordination entre les différents fusibles étant assurée par des caractéristiques (I,t) appropriées. La présence de production sur les réseaux BT modifie la répartition des courants en cas de défaut et pose trois problèmes majeurs de fonctionnement du plan de protection.

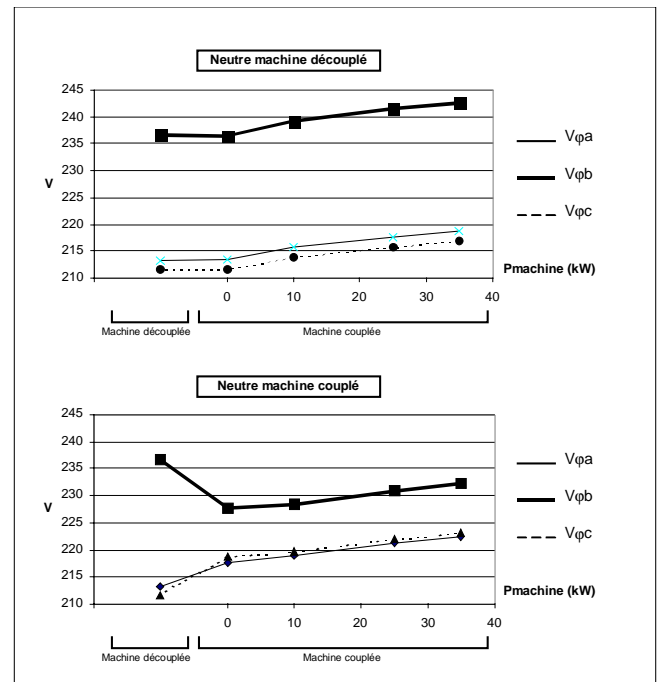


Figure 3. Effet du couplage du neutre d'une installation de production sur le déséquilibre de tension

Si on considère un fusible en tête de départ BT sur lequel est raccordée une installation de production, on constatera :

- un retour de courant à travers le fusible en cas de court-circuit en amont de celui-ci. Si le fusible est sollicité dans sa zone non coupure, sa fusion pourra être dangereuse. Pour des valeurs extrêmes de courant, on aura une fusion intempestive du fusible.
- une diminution du courant de défaut vu par le fusible lors d'un court-circuit sur le départ BT, pouvant conduire à une mauvaise coordination de la chaîne de fusibles, voire à la non fusion du fusible du départ.

On retrouve les deux problèmes génériques de fonctionnement du plan de protection MT [2].

A la différence des disjoncteurs MT à ouverture tripolaire, les fusibles ont la particularité de n'isoler que les phases en défaut. Ainsi, en présence d'un défaut phase-terre menant à la fusion d'un fusible, un producteur placé en aval de ce fusible ne sera raccordé que sur les deux phases saines au transformateur MT/BT. Cette situation peut présenter des risques pour le matériel dans l'installation de production.

L'ensemble des problèmes cités ci-dessus peuvent conduire à envisager une architecture de branchement spécifique pour une installation électrogène pure ou d'un client existant désirant s'équiper d'un groupe de production.

Il convient également de s'assurer que le raccordement d'un nombre important d'unités de production raccordées sur des réseaux BT desservis par un même départ MT ne vient pas perturber le fonctionnement de la protection de ce départ MT.

4.4 Protection de découplage

Les protections de découplage utilisées en BT ont pour fonctions d'assurer le déclenchement des unités en cas de défaut d'isolement en réseau ou en cas d'alimentation d'une partie du réseau BT en régime iloté par les unités, suite à l'ouverture d'un organe de coupure. La mise en œuvre de ces protections pose néanmoins quelques difficultés du fait des caractéristiques propres des réseaux BT et des contraintes de coût qui nécessitent de recourir à des solutions techniques simples.

Du fait de la séparation des régimes de neutre MT et BT, il est impossible de détecter en BT un défaut MT à la terre sur critère voltométrique homopolaire. Lors de tels défauts, le découplage des unités raccordées en BT sera garanti si les dérives de tension et de fréquence lors de l'ouverture du départ MT sont suffisamment importantes et rapides. Ces conditions sont remplies si la somme des puissances des unités raccordées au départ MT est inférieure à 50% de la charge minimale appelée par ce départ. Cette règle a été établie en supposant des installations constituées de machines tournantes et il convient de s'assurer de sa validité avec des convertisseurs de puissance de divers types.

Il est également nécessaire de s'assurer que le recours à des convertisseurs de puissance ne diminue pas la sensibilité des protections de découplage lors de défauts d'isolement en MT et BT. L'existence de fonctions de protection intégrées dans le contrôle-commande des interfaces électroniques et la facilité d'y implémenter de nouvelles fonctions amène la question de leur reconnaissance par le distributeur pour assurer le rôle des fonctions de découplage.

4.5 Injections harmoniques

Une des principales caractéristiques des convertisseurs de puissance est l'injection de courants harmoniques sur le réseau. Du fait de la faible pénétration des moyens de production couplés au réseau BT par interfaces électroniques, peu d'études ont été menées à ce jour sur l'impact que ceux-ci pourraient avoir sur la distorsion de la forme d'onde de tension et sur les appareils en réseau et chez les clients.

En absence de normes internationales traitant explicitement des limites d'émissions dans la bande 0-2 kHz des installations de production, le cadre réglementaire français n'a pu être fixé.

On notera toutefois que les technologies modernes d'électronique de puissance permettent la mise en œuvre de convertisseurs à découpage haute fréquence (type MLI) rejetant les premiers harmoniques de courant dans la gamme de fréquence de 2 à 20 kHz environ. L'effet de ces courants haute fréquence sur les réseaux BT et les clients est actuellement à l'étude. Les résultats permettront d'établir les

niveaux d'émission maximaux dans cette bande de fréquence.

4.6 Raccordements monophasés

L'émergence de moyens de stockage ou de production fortement décentralisés peut laisser penser à un accroissement du nombre de raccordements d'installations monophasées. Ces raccordements lèvent un certain nombre de questions dont leur impact sur le déséquilibre du réseau, le plan de protection, le choix de l'architecture de branchement et la définition des consignes d'exploitation.

Une partie de ces questions ont été traitées dans le cadre des récents travaux sur les installations photovoltaïques représentant actuellement la majeure partie des raccordements monophasés. Ces travaux devraient déboucher prochainement sur la publication d'une réglementation applicable à ce type d'installations. Deux résultats principaux ressortent.

La réglementation exige l'existence d'un point de coupure accessible depuis le domaine public, permettant une ouverture visible des circuits lors d'interventions sur le réseau.

Pour les unités de puissance inférieure à 3 kVA, on admet que l'onduleur serve de protection de découplage, dès lors qu'il réponde aux cahier des charges fonctionnel retenu dans les arrêtés ministériels. Dans ce cas, le découplage doit être assuré a minima par un contacteur distinct et non par des composants semi-conducteur. La vérification de la conformité du matériel vis à vis de ces prescriptions doit être effectuée par un laboratoire agréé. Pour la constitution des protections et organes de découplage des unités de puissance supérieure à 3 kVA, la réglementation générale s'applique.

5. CONTRAINTES POUR L'EXPLOITATION ET LA CONDUITE

Les difficultés croissantes rencontrées pour conduire le réseau MT dans des conditions de fiabilité et de sécurité suffisantes ont nécessité la mise en place de règles relatives à la gestion et à la conduite du réseau. Ces règles applicables aux installations dont la puissance est jugée non marginale par rapport à la puissance des ouvrages du réseau sont de deux types :

- pour la gestion prévisionnelle du réseau, fournir un programme de fonctionnement,
- pour la conduite temps réel, être équipé d'un dispositif permettant au conducteur de réseau d'obtenir des informations sur l'état de l'installation et d'envoyer certaines télécommandes.

A l'heure actuelle, le réseau BT présente la particularité de ne pas être doté de moyens de surveillance et de mesures permettant la détection d'anomalies et la connaissance de l'état du réseau. La réglementation actuelle ne fait état

d'aucune obligation de la part d'un producteur raccordé au réseau BT vis à vis de l'exploitant dans le domaine de la conduite. Des réflexions sont actuellement en cours pour déterminer les échanges d'informations et les moyens d'actions et de surveillance qu'il conviendrait de mettre en œuvre dès lors que le nombre ou la puissance des installations raccordées en BT nécessite d'en tenir compte dans la conduite de certaines parties du réseau. En matière de surveillance, il pourrait s'agir par exemple de rapatrier des mesures et des informations à partir des postes MT/BT. Des moyens d'actions centralisés en direction des producteurs transmis par CPL ou TCFM (ordres de couplage, autorisation de recouplage ...) pourraient également être envisagés.

Le nombre croissant et la diversité des types d'installations de production raccordées en BT risque également de rendre plus complexe les interventions sur le réseau. Des dispositions spéciales doivent être définies pour assurer la sécurité de l'exploitant : consignes d'exploitation, conditions de couplage, découplage et recouplage au réseau suite à un incident.

6. METHODES ET OUTILS D'ETUDE

L'analyse ci-dessus des contraintes posées par le raccordement de la production répartie raccordée en BT montre la difficulté d'établir des règles simples permettant de déterminer la capacité d'accueil d'une partie d'un réseau BT. La faisabilité d'un raccordement dépend en effet de nombreux éléments dont :

- les caractéristiques du réseau BT et du départ MT le desservant : conducteurs, profils des charges BT et MT, réglage du plan de protection...
- la présence d'autres installations de production en BT et MT
- le type d'installation envisagée
- le type de régime de neutre pouvant être adopté pour l'installation.

Pour de nombreux points techniques, seule une étude au cas par cas permettra de trancher sur la faisabilité du raccordement. Une conclusion similaire a été établie pour les raccordements MT et EDF a décidé en 1996 de lancer le projet ESTERE de développement d'un outil informatique d'aide à la décision. Cet outil est aujourd'hui disponible et permet de traiter sur une plate-forme d'accueil unique quatre problèmes cruciaux de raccordement : contraintes thermiques, contraintes de tension, puissance de court-circuit et réglage du plan de protection.

L'adjonction à ESTERE de fonctions permettant d'instruire des demandes de raccordement en BT est actuellement envisagée. L'intérêt de cette démarche résiderait dans l'utilisation des bases de données existantes des réseaux MT et BT et la reprise des méthodes et algorithmes de calcul déjà développés pour la MT. L'étude de l'effet des

raccordements sur le fonctionnement du réseau MT serait également facilitée.

7. CONCLUSION

Les premières études menées par EDF montrent que le développement prévisible de la production décentralisée sur les réseaux BT pose des contraintes pour le fonctionnement, la conduite et l'exploitation des réseaux BT et MT. Pour être en mesure de créer les conditions d'accueil satisfaisantes, tant pour les producteurs que les clients, EDF a décidé de lancer un programme d'études sur deux ans visant à remplir les objectifs suivants :

- analyser les contraintes d'insertion en réseau, en particulier pour prendre en compte les évolutions technologiques des matériels de production,
- définir les méthodes d'étude de raccordement et les intégrer à un référentiel d'études,
- développer et mettre à disposition du distributeur des outils informatiques lui permettant d'évaluer l'impact d'un raccordement sur le réseau.

[1] "Arrêté du 21 mai 1997 relatif aux conditions techniques de raccordement au réseau public des installations de production autonome d'énergie électrique de moins de 1 MW", *Journal officiel de la République Française du 21 juillet 1997*

[2] J.L. Fraisse, P. Michalak, P. Juston, A. Grandet, "Conditions techniques de raccordement des ouvrages de production au réseau moyenne tension - Développement d'un filtre actif 175 Hz pour producteur", *Actes du CIREN 1997*, Vol. 1, Article No.5.14, Birmingham, UK, June 2-15, 1997

[3] Y. Pourcin, J. Fourgous, B. Battaglia, "Raccordement des petites unités de Production sur les réseaux publics de distribution MT et BT d'Electricité de France - Aspects techniques et économiques", *Actes du CIREN 1983*, Article No.a.02, Liège, Belgique, 1983