

Union internationale des télécommunications

UIT-T

SECTEUR DE LA NORMALISATION
DES TÉLÉCOMMUNICATIONS
DE L'UIT

Y.3021

(01/2012)

SÉRIE Y: INFRASTRUCTURE MONDIALE DE
L'INFORMATION, PROTOCOLE INTERNET ET
RÉSEAUX DE PROCHAINE GÉNÉRATION

Réseaux de prochaine génération – Réseaux futurs

**Cadre applicable à la réalisation d'économies
d'énergie dans les réseaux futurs**

Recommandation UIT-T Y.3021



RECOMMANDATIONS UIT-T DE LA SÉRIE Y
**INFRASTRUCTURE MONDIALE DE L'INFORMATION, PROTOCOLE INTERNET ET RÉSEAUX DE
PROCHAINE GÉNÉRATION**

INFRASTRUCTURE MONDIALE DE L'INFORMATION	
Généralités	Y.100–Y.199
Services, applications et intergiciels	Y.200–Y.299
Aspects réseau	Y.300–Y.399
Interfaces et protocoles	Y.400–Y.499
Numérotage, adressage et dénomination	Y.500–Y.599
Gestion, exploitation et maintenance	Y.600–Y.699
Sécurité	Y.700–Y.799
Performances	Y.800–Y.899
ASPECTS RELATIFS AU PROTOCOLE INTERNET	
Généralités	Y.1000–Y.1099
Services et applications	Y.1100–Y.1199
Architecture, accès, capacités de réseau et gestion des ressources	Y.1200–Y.1299
Transport	Y.1300–Y.1399
Interfonctionnement	Y.1400–Y.1499
Qualité de service et performances de réseau	Y.1500–Y.1599
Signalisation	Y.1600–Y.1699
Gestion, exploitation et maintenance	Y.1700–Y.1799
Taxation	Y.1800–Y.1899
Télévision IP sur réseaux de prochaine génération	Y.1900–Y.1999
RÉSEAUX DE PROCHAINE GÉNÉRATION	
Cadre général et modèles architecturaux fonctionnels	Y.2000–Y.2099
Qualité de service et performances	Y.2100–Y.2199
Aspects relatifs aux services: capacités et architecture des services	Y.2200–Y.2249
Aspects relatifs aux services: interopérabilité des services et réseaux dans les réseaux de prochaine génération	Y.2250–Y.2299
Améliorations concernant les réseaux de prochaine génération	Y.2300–Y.2399
Gestion de réseau	Y.2400–Y.2499
Architectures et protocoles de commande de réseau	Y.2500–Y.2599
Réseaux de transmission par paquets	Y.2600–Y.2699
Sécurité	Y.2700–Y.2799
Mobilité généralisée	Y.2800–Y.2899
Environnement ouvert de qualité opérateur	Y.2900–Y.2999
RÉSEAUX FUTURS	Y.3000–Y.3499
INFORMATIQUE EN NUAGE	Y.3500–Y.3999

Pour plus de détails, voir la Liste des Recommandations de l'UIT-T.

Recommandation UIT-T Y.3021

Cadre applicable à la réalisation d'économies d'énergie dans les réseaux futurs

Résumé

La Recommandation UIT-T Y.3021 décrit le cadre applicable à la réalisation d'économies d'énergie dans les réseaux futurs. Elle décrit d'abord la nécessité de réaliser des économies d'énergie dans les réseaux proprement dits, et passe en revue les techniques possibles pour y parvenir. Elle identifie ensuite les principales fonctions et leurs interactions cycliques, analyse les incidences possibles de la mise en place de certaines techniques économes en énergie et précise les exigences de haut niveau relatives à la mise en place de telles techniques.

Historique

Edition	Recommandation	Approbation	Commission d'études	ID unique*
1.0	ITU-T Y.3021	2012-01-13	13	11.1002/1000/11446

* Pour accéder à la Recommandation, reporter cet URL <http://handle.itu.int/> dans votre navigateur Web, suivi de l'identifiant unique, par exemple <http://handle.itu.int/11.1002/1000/11830-en>.

AVANT-PROPOS

L'Union internationale des télécommunications (UIT) est une institution spécialisée des Nations Unies dans le domaine des télécommunications et des technologies de l'information et de la communication (ICT). Le Secteur de la normalisation des télécommunications (UIT-T) est un organe permanent de l'UIT. Il est chargé de l'étude des questions techniques, d'exploitation et de tarification, et émet à ce sujet des Recommandations en vue de la normalisation des télécommunications à l'échelle mondiale.

L'Assemblée mondiale de normalisation des télécommunications (AMNT), qui se réunit tous les quatre ans, détermine les thèmes d'étude à traiter par les Commissions d'études de l'UIT-T, lesquelles élaborent en retour des Recommandations sur ces thèmes.

L'approbation des Recommandations par les Membres de l'UIT-T s'effectue selon la procédure définie dans la Résolution 1 de l'AMNT.

Dans certains secteurs des technologies de l'information qui correspondent à la sphère de compétence de l'UIT-T, les normes nécessaires se préparent en collaboration avec l'ISO et la CEI.

NOTE

Dans la présente Recommandation, l'expression "Administration" est utilisée pour désigner de façon abrégée aussi bien une administration de télécommunications qu'une exploitation reconnue.

Le respect de cette Recommandation se fait à titre volontaire. Cependant, il se peut que la Recommandation contienne certaines dispositions obligatoires (pour assurer, par exemple, l'interopérabilité et l'applicabilité) et considère que la Recommandation est respectée lorsque toutes ces dispositions sont observées. Le futur d'obligation et les autres moyens d'expression de l'obligation comme le verbe "devoir" ainsi que leurs formes négatives servent à énoncer des prescriptions. L'utilisation de ces formes ne signifie pas qu'il est obligatoire de respecter la Recommandation.

DROITS DE PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

L'UIT attire l'attention sur la possibilité que l'application ou la mise en œuvre de la présente Recommandation puisse donner lieu à l'utilisation d'un droit de propriété intellectuelle. L'UIT ne prend pas position en ce qui concerne l'existence, la validité ou l'applicabilité des droits de propriété intellectuelle, qu'ils soient revendiqués par un membre de l'UIT ou par une tierce partie étrangère à la procédure d'élaboration des Recommandations.

A la date d'approbation de la présente Recommandation, l'UIT n'avait pas été avisée de l'existence d'une propriété intellectuelle protégée par des brevets à acquérir pour mettre en œuvre la présente Recommandation. Toutefois, comme il ne s'agit peut-être pas de renseignements les plus récents, il est vivement recommandé aux développeurs de consulter la base de données des brevets du TSB sous <http://www.itu.int/ITU-T/ipr/>.

© UIT 2014

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
1	Domaine d'application 1
2	Références..... 1
3	Définitions 1
3.1	Termes définis ailleurs 1
3.2	Termes définis dans la présente Recommandation 1
4	Abréviations et acronymes 2
5	Conventions 3
6	Introduction 3
6.1	Contexte et justification..... 3
6.2	Etapes du cycle de vie et niveaux à prendre en compte 4
7	Passage en revue des techniques économes en énergie 5
7.1	Liste des techniques pour les différents niveaux 5
7.2	Techniques au niveau des dispositifs 5
7.3	Techniques au niveau des équipements..... 6
7.4	Techniques au niveau du réseau 9
8	Considérations relatives à la réalisation d'économies d'énergie 12
8.1	Domaine ciblé par la présente Recommandation 12
8.2	Méthodes à utiliser pour réaliser des économies d'énergie 12
8.3	Commande du fonctionnement des dispositifs/équipements en fonction de la dynamique du trafic 14
8.4	Transmission du trafic en utilisant moins d'énergie 15
8.5	Classement des différentes techniques 15
9	Fonctions possibles et leurs interactions 17
9.1	Fonctions possibles..... 17
9.2	Modèles de combinaison des fonctions 19
10	Analyse des incidences de la réalisation d'économies d'énergie 20
10.1	Incidences sur la qualité de fonctionnement du réseau 20
10.2	Incidences sur la mise en place de services 21
11	Exigences de haut niveau..... 22
12	Considérations liées à l'environnement 23
13	Considérations liées à la sécurité..... 23
	Bibliographie..... 24

Recommandation UIT-T Y.3021

Cadre applicable à la réalisation d'économies d'énergie dans les réseaux futurs

1 Domaine d'application

La présente Recommandation:

- décrit la nécessité de réaliser des économies d'énergie,
- passe en revue les techniques possibles,
- recense les différents points de vue à prendre en compte,
- identifie les principales fonctions et leurs interactions cycliques,
- analyse les incidences pouvant résulter de la mise en place des techniques, et
- précise les exigences de haut niveau;

afin de réaliser des économies d'énergie dans les réseaux futurs et grâce à ces réseaux.

La description du cadre et des principes figurant dans la présente Recommandation peut aussi s'appliquer et être utile pour les réseaux qui ne sont pas classés dans la catégorie des réseaux futurs, même si elle repose entièrement sur les objectifs et buts de conception des réseaux futurs [UIT-T Y.3001].

2 Références

La présente Recommandation se réfère à certaines dispositions des Recommandations UIT-T et textes suivants qui, de ce fait, en sont partie intégrante. Les versions indiquées étaient en vigueur au moment de la publication de la présente Recommandation. Toute Recommandation ou tout texte étant sujet à révision, les utilisateurs de la présente Recommandation sont invités à se reporter, si possible, aux versions les plus récentes des références normatives suivantes. La liste des Recommandations de l'UIT-T en vigueur est régulièrement publiée. La référence à un document figurant dans la présente Recommandation ne donne pas à ce document, en tant que tel, le statut d'une Recommandation.

[UIT-T L.1400] Recommandation UIT-T L.1400 (2011), *Aperçu et principes généraux des méthodes d'évaluation de l'impact des TIC sur l'environnement.*

[UIT-T Y.3001] Recommandation UIT-T Y.3001 (2011), *Réseaux futurs: Objectifs et buts de conception.*

3 Définitions

3.1 Termes définis ailleurs

La présente Recommandation utilise le terme suivant défini ailleurs:

3.1.1 réseau futur [UIT-T Y.3001]: réseau permettant de fournir des services, des capacités et des fonctionnalités qui sont difficiles à fournir au moyen des technologies de réseau existantes.

3.2 Termes définis dans la présente Recommandation

La présente Recommandation définit les termes suivants:

3.2.1 dispositif: élément matériel ou assemblage d'éléments matériels destiné à exécuter une fonction requise.

3.2.2 réalisation d'économies d'énergie dans les réseaux: correspond à la situation où les capacités des réseaux et leur exploitation sont configurées d'une manière qui permet aux équipements de réseau d'utiliser systématiquement l'énergie totale de manière efficace, d'où une réduction de la consommation d'énergie par rapport à l'énergie consommée dans les réseaux n'ayant pas cette configuration.

NOTE – Parmi les équipements de réseau, figurent les routeurs, les commutateurs, les équipements au point de terminaison, par exemple les unités de réseau optique (ONU, *optical network unit*), les passerelles domestiques, les serveurs de réseau, les équilibreurs de charge et les pare-feu. Les équipements de réseau sont généralement composés de divers composants (module de commutation, cartes de ligne, alimentation électrique, refroidissement, etc.).

3.2.3 équipement: assemblage d'un ensemble de dispositifs en une entité physique destinée à exécuter une tâche particulière.

3.2.4 efficacité énergétique d'un réseau: débit du réseau divisé par l'énergie consommée.

NOTE – Elle est généralement exprimée en bits/s/W.

4 Abréviations et acronymes

La présente Recommandation utilise les abréviations et acronymes suivants:

ALR	débit de liaison adaptatif (<i>adaptive link rate</i>)
BTS	émetteur-récepteur de base, station de base (<i>base transceiver station</i>)
CAM	mémoire adressable par le contenu (<i>content addressable memory</i>)
CAPWAP	commande et configuration des points d'accès sans fil (<i>control and provisioning of wireless access points</i>)
CDN	réseau de fourniture de contenu (<i>content delivery network</i>)
CPU	unité centrale de traitement, processeur (<i>central processing unit</i>)
DDoS	déni de service réparti (<i>distributed denial-of-service</i>)
DPD	pré-distorsion numérique (<i>digital pre-distortion</i>)
DVS	réglage dynamique de la tension (<i>dynamic voltage scaling</i>)
FN	réseau futur (<i>future network</i>)
GHG	gaz à effet de serre (<i>greenhouse gas</i>)
HVHBT	transistor bipolaire à hétérojonction haute tension (<i>high voltage heterojunction bipolar transistor</i>)
LSI	circuit à haute densité d'intégration (<i>large scale integration</i>)
MIMO	entrées multiples, sorties multiples (<i>multiple input multiple output</i>)
MPLS	commutation par étiquette multiprotocole (<i>multi-protocol label switching</i>)
NIC	carte d'interface de réseau (<i>network interface card</i>)
ONU	unité de réseau optique (<i>optical network unit</i>)
PA	amplificateur de puissance (<i>power amplifier</i>)
PC	ordinateur personnel (<i>personal computer</i>)
SINR	rapport signal sur brouillage et bruit (<i>signal to interference and noise ratio</i>)
SISO	entrée unique, sortie unique (<i>single-input single-output</i>)
SLA	accord de niveau de service (<i>service level agreement</i>)

SRAM	mémoire vive statique (<i>static random access memory</i>)
TIC	technologies de l'information et de la communication
UE	équipement d'utilisateur (<i>user equipment</i>)
WLAN	réseau local sans fil (<i>wireless local area network</i>)

5 Conventions

Aucune.

6 Introduction

6.1 Contexte et justification

La réalisation d'économies d'énergie dans le domaine des technologies de l'information et de la communication (TIC, *information and communication technology*) est une question importante, comme indiqué dans le cadre de la conception des réseaux futurs [UIT-T Y.3001]. L'un des objectifs de base du développement des réseaux futurs est de faire preuve d'une conscience environnementale, objectif qui peut être atteint grâce à l'utilisation de techniques économes en énergie. Depuis longtemps, des études sont menées sur les économies d'énergie afin d'augmenter les avantages pour l'utilisateur ou l'entreprise, par exemple à réduire les coûts énergétiques et à assurer une gestion de la température permettant un fonctionnement stable des machines.

Ces questions revêtent une importance grandissante en raison de l'implémentation d'équipements de réseau plus nombreux et de la plus grande consommation d'énergie que cela suppose. Elles sont également de plus en plus importantes dans la société, qui cherche à réduire les émissions de gaz à effet de serre (GHG, *greenhouse gas*). L'importance de ces questions ira croissant dans l'avenir. La présente Recommandation porte donc sur les techniques qui, seules ou combinées, pourront contribuer à la réalisation d'économies d'énergie et à l'accomplissement de divers autres objectifs.

La contribution des TIC à la réduction de l'impact négatif sur l'environnement est souvent scindée en deux, à savoir le "passage au vert grâce aux TIC" et les "TIC vertes". Par "passage au vert grâce aux TIC", on entend la réduction de l'impact des secteurs autres que celui des TIC sur l'environnement grâce à l'utilisation des TIC. Par "TIC vertes", on entend la réduction de l'impact des TIC proprement dites sur l'environnement, par exemple la réduction de la consommation électrique des ordinateurs personnels (PC), serveurs et routeurs. La contribution des réseaux futurs à la réduction de l'impact sur l'environnement peut donc être scindée en deux, comme indiqué ci-après.

- Passage au vert grâce aux réseaux futurs
Ou comment réduire l'impact des secteurs autres que le secteur des TIC sur l'environnement grâce à l'utilisation des réseaux futurs.
Les réseaux futurs doivent devenir un outil utile pour la réduction de l'impact des autres secteurs sur l'environnement. La conception d'une architecture de réseau électrique intelligent pour la distribution de l'électricité, ou la mise en place de réseaux de capteurs ubiquitaires afin de suivre les changements environnementaux de la planète sont des exemples de concrétisations possibles du "passage au vert grâce aux réseaux futurs".
- Réseaux futurs verts
Ou comment réduire l'impact des réseaux futurs sur l'environnement.
Le principe fondamental des réseaux futurs est qu'ils doivent avoir le moins d'impact possible sur l'environnement. Comme décrit plus haut, l'utilisation de réseaux peut permettre de réduire l'impact des autres secteurs sur l'environnement. Cependant, cette utilisation entraîne un accroissement du volume de trafic circulant dans les réseaux et,

partant, un accroissement de la consommation d'énergie des réseaux, d'où une augmentation de l'impact sur l'environnement. La réduction de la consommation d'énergie des équipements de réseau tels que les routeurs, les commutateurs et les serveurs est un exemple direct de contribution à l'existence de "réseaux futurs verts".

Chacune des questions est importante, mais la présente Recommandation se limite aux "réseaux futurs verts", c'est-à-dire à la réalisation d'économies d'énergie dans les réseaux proprement dits, car la consommation d'énergie par les réseaux augmente rapidement à mesure que le nombre d'applications sur les réseaux augmente.

6.2 Etapes du cycle de vie et niveaux à prendre en compte

Pour réduire la consommation d'énergie, il est important d'analyser la consommation d'énergie à chaque étape du cycle de vie. Dans la gestion du cycle de vie, on utilise généralement les étapes suivantes pour cette analyse (par exemple dans [UIT-T L.1400]):

- production (préparation des matières premières et des composants nécessaires);
- fabrication;
- utilisation;
- élimination/recyclage.

Dans le cas d'un réseau, la première étape – production – consiste à préparer les matières premières pour les petits dispositifs électroniques et les composants à inclure dans les équipements. La deuxième étape – fabrication – comporte la construction du réseau au moyen des équipements. Pour la construction du réseau, les équipements nécessaires sont transportés du site du fabricant au site de construction. La troisième étape – utilisation – est celle de l'exploitation des équipements. A la fin de la durée utile du réseau, celui-ci, y compris tous les équipements, sont éliminés et/ou recyclés au cours de la quatrième étape – élimination/recyclage. Dans la gestion du cycle de vie, toutes ces étapes sont prises en compte. Toutefois, dans le cas d'un réseau, on prend en compte avant tout la troisième étape – utilisation – car c'est généralement l'étape dans laquelle la consommation d'énergie est la plus problématique pour les équipements de réseau connectés en permanence, et que la consommation d'énergie dans cette étape peut être contrôlée par l'architecture, les capacités et l'exploitation du réseau.

La réalisation d'économies d'énergie dans les réseaux repose sur diverses techniques. Il est irréaliste de ne recourir qu'à une seule technique. Dans l'étape d'utilisation, on peut prendre en compte trois niveaux et les techniques correspondantes, à savoir:

- Niveau des dispositifs
Techniques qui s'appliquent aux dispositifs électroniques, comme les circuits à haute densité d'intégration (LSI, *large scale integration*) et les mémoires.
- Niveau des équipements
Techniques qui s'appliquent à un type d'équipement donné (un ensemble de dispositifs) tel qu'un routeur ou un commutateur.
- Niveau du réseau
Techniques qui s'appliquent aux équipements du réseau tout entier (par exemple un protocole de routage appliqué à de multiples routeurs).

Les techniques recensées à chaque niveau et leur combinaison vont changer et évoluer. Les réseaux futurs devraient incorporer ces techniques et adopter en souplesse les techniques nouvelles et évoluées afin d'accroître les économies d'énergie réalisables.

7 Passage en revue des techniques économes en énergie

7.1 Liste des techniques pour les différents niveaux

Pour chacun des trois niveaux décrits au § 6, on recense diverses techniques possibles, comme suit:

- Techniques au niveau des dispositifs
Circuits LSI, processeur multicoeur, coupure de signal d'horloge, mémoire virtuelle prenant en compte l'énergie, amplificateur de puissance évolué.
- Techniques au niveau des équipements
Nœud de réseau optique, commande de mode veille, débit de liaison adaptatif (ALR, *adaptive link rate*)/réglage dynamique de la tension (DVS, *dynamic voltage scaling*), conception thermique, serveur cache, filtrage, serveur de notification d'indisponibilité, mise en forme, stations de base (BTS, *base transceiver station*) compactes, techniques d'antennes intelligentes, stations relais.
- Techniques au niveau du réseau
Commutation de circuits/salves, routage/ingénierie du trafic basé sur la consommation d'énergie, protocole simple, programmation de la transmission, réseau de fourniture de contenu (CDN, *content delivery network*), décalage de trafic en période de pointe, conception de petites cellules, planification du réseau prenant en compte l'énergie.

Les paragraphes 7.2 à 7.4 décrivent chacune des techniques recensées aux niveaux des dispositifs, des équipements et du réseau. Ce recensement pourra évoluer dans l'avenir avec l'amélioration des techniques de mise en œuvre.

7.2 Techniques au niveau des dispositifs

7.2.1 Circuits LSI

Pour une fonction et/ou une performance donnée, plus la densité d'intégration des circuits LSI augmente, plus leur taille diminue. Etant donné que les circuits LSI permettent de réduire la tension de commande, il s'ensuit une réduction de la consommation d'énergie qui est proportionnelle au carré de la tension de commande. Jusqu'à présent, le gain était de 30% par an, mais il a ralenti ces derniers temps en raison d'une augmentation du courant de fuite. Certains fabricants de circuits LSI envisagent diverses solutions pour faire face à ce ralentissement et augmenter le gain.

7.2.2 Processeur multicoeur

Il s'agit d'une technique consistant à installer plusieurs coeurs dans un même processeur. Pour une tâche donnée, l'utilisation de plusieurs coeurs basse performance permet généralement de réaliser davantage d'économies d'énergie que l'utilisation d'un seul coeur haute performance en raison des caractéristiques matérielles des dispositifs électroniques. En effet, d'une manière générale, la consommation d'énergie est proportionnelle à la fréquence d'horloge au cube, et la présence de plusieurs coeurs est plus avantageuse en termes de consommation d'énergie. De plus, si on a besoin d'une très haute performance qu'il est impossible d'obtenir avec un seul coeur, le recours à plusieurs coeurs est la seule solution.

Par ailleurs, le processeur multicoeur peut fonctionner avec des techniques de commande dynamique telles que la coupure du signal d'horloge (voir le § 7.2.3) et la commande du mode veille (voir le § 7.3.2). Ces techniques commandent l'alimentation électrique et la fréquence d'horloge parmi plusieurs coeurs, afin de faire fonctionner le nombre minimal requis de coeurs à la fréquence d'horloge minimale. Si ces deux paramètres, à savoir le nombre de coeurs actifs et leur fréquence d'horloge, sont commandés correctement en fonction de la charge, on peut réaliser des économies d'énergie.

7.2.3 Coupure de signal d'horloge

Il s'agit d'une technique consistant à arrêter de fournir le signal d'horloge aux circuits LSI et autres circuits lorsqu'aucune tâche n'est nécessaire. Plus l'absence de fourniture du signal d'horloge dure longtemps, plus on peut réaliser des économies d'énergie importantes. Un problème se pose si la transition entre les états ON et OFF de l'horloge se produit fréquemment, auquel cas les économies d'énergie sont moins importantes car ces transitions nécessitent de l'énergie.

7.2.4 Mémoire virtuelle prenant en compte l'énergie

Il s'agit d'une technique permettant d'optimiser la consommation d'énergie d'une mémoire en commandant un élément actif de la mémoire en fonction de la demande et de l'utilisation effectives [b-Huang]. Sur le plan des économies d'énergie, cette technique est mise en œuvre dans la mémoire tampon et dans la mémoire cache des nœuds de réseau.

7.2.5 Amplificateur de puissance évolué

Il s'agit d'un amplificateur de puissance qui, utilisé dans les stations de base des réseaux sans fil, en améliore considérablement le rendement, ce qui est difficile à obtenir avec les techniques existantes disponibles sur le marché. Etant donné que l'amplificateur de puissance seul compte pour une grande part dans la consommation d'énergie totale des stations de base des réseaux sans fil, l'utilisation d'amplificateurs de puissance à haut rendement permet de réduire la consommation d'énergie [b-ATIS]. Pour l'amplificateur de puissance évolué, il convient de tenir compte de l'application des circuits, du choix des composants et de l'innovation des processus. Comme exemples de cette technique, on peut citer la pré-distorsion numérique (DPD, *digital pre-distortion*) et le transistor bipolaire à hétérojonction haute tension (HVHBT, *high voltage heterojunction bipolar transistor*). En cas de distorsion dans l'amplificateur de puissance, la DPD introduit une distorsion dans le sens opposé à celui de la distorsion de l'amplificateur de puissance, ce qui a pour effet d'annuler la distorsion. Le HVHBT est une puce évoluée qui améliore le rendement.

7.3 Techniques au niveau des équipements

7.3.1 Nœud de réseau optique

Cette technique vise à implémenter des techniques optiques à faible consommation d'énergie dans les interfaces de transmission et/ou les modules de commutation d'un nœud de réseau. Un nœud de réseau optique a une capacité beaucoup plus grande qu'un nœud de réseau électronique, avec des débits de l'ordre du Tbit/s ou plus, ce qui permet d'améliorer considérablement l'efficacité énergétique du réseau [b-Klein]. L'amélioration est fondée sur une importante agrégation du trafic à l'intérieur ou à l'extérieur du nœud. Un problème se pose si le trafic s'écoule de manière clairsemée, auquel cas on ne peut atteindre une efficacité énergétique suffisante.

La commutation par paquets tout optique permet d'améliorer l'efficacité énergétique du réseau en évitant, dans les nœuds de réseau, les conversions optique-électrique et électrique-optique, qui consomment habituellement beaucoup d'énergie. Mais dans la pratique, le tout optique reste difficile à implémenter à grande échelle, essentiellement en raison de la difficulté à mémoriser le signal optique tel qu'il est.

7.3.2 Commande de mode veille

Il s'agit d'une technique qui met les équipements et les fonctions en "mode veille" lorsqu'ils ne sont pas utilisés, ce qui permet de conserver l'énergie. Au niveau d'équipements tels que les routeurs et les commutateurs dans les réseaux filaires, ou les stations de base radioélectriques et les dispositifs mobiles dans les réseaux sans fil, la commande du mode veille est généralement mise en œuvre dans l'interface entre l'équipement et le réseau. Les économies d'énergie réalisées dépendent de la dynamique du trafic. Plus la différence entre le trafic maximal et le trafic minimal est grande, plus les économies d'énergie réalisables sont importantes. En effet, la consommation d'énergie d'un

équipement sans commande de mode veille est pratiquement constante, et dépend du trafic maximal à prendre en charge. Avec la commande de mode veille, si le trafic qui emprunte des trajets parallèles pendant une période donnée est inférieur au maximum, certains flux peuvent être agrégés dynamiquement sur un même trajet, et les équipements inutiles pour ce trajet peuvent passer en mode veille. La réduction de la consommation d'énergie dépend du trafic minimum.

Dans les réseaux filaires, l'obstacle à l'utilisation de cette technique est le trafic de commande régulier, peu volumineux mais important à acheminer, par exemple les informations de routage, même s'il n'y a pas de trafic de données. Par conséquent, il faut examiner la question de la méthode de traitement du trafic de commande. Une solution consiste à utiliser un "proxy", qui maintient une présence dans le réseau pendant qu'un nœud de réseau, quel qu'il soit, est en mode veille, et qui répond au trafic de réseau régulier en lieu et place du nœud de réseau proprement dit. Cette technique est décrite en détail dans la *computer specification Version 5.0* d'*ENERGY STAR* [b-ESTAR1]. Pour assurer la commande de mode veille, on peut par exemple utiliser le protocole Ethernet d'efficacité énergétique élaboré par l'*Energy Efficient Ethernet Task Force* [b-IEEE P802.3az] ou le mode d'économie d'énergie L2 (par exemple mode faible puissance) combiné avec les techniques existantes ADSL2 et ADSL2plus.

En revanche, dans les réseaux sans fil, un logiciel de commande du mode veille et un fonctionnement en mode veille sont implémentés respectivement dans les stations de base radioélectriques et dans les dispositifs mobiles afin de réaliser des économies d'énergie. Dans les stations de base radioélectriques, le logiciel de commande du mode veille désactive une bande avec peu de trafic dans la cellule correspondante, ou la totalité de la station de base radioélectrique. Pendant le fonctionnement en mode veille, les dispositifs mobiles passent alternativement de l'état de veille à l'état d'écoute et inversement. Dans l'état de veille, les dispositifs mobiles ont leur batterie hors tension et ne communiquent pas avec leur station de base radioélectrique correspondante. Dans l'état d'écoute, ils vérifient si un message de réveil leur est envoyé par leur station de base radioélectrique de desserte.

7.3.3 Débit de liaison adaptatif (ALR) et réglage dynamique de la tension (DVS)

Il s'agit d'un mode de fonctionnement économe en énergie des équipements de réseau. ALR commande le débit de liaison à l'interface en fonction de la quantité de trafic à traiter. DVS commande la tension de commande du processeur, du disque dur, de la carte d'interface réseau (NIC), etc., en fonction de la quantité de trafic à traiter. Le problème avec cette technique concerne la question de savoir comment traiter le trafic par salves (par exemple comment réagir rapidement et avec quelle efficacité en cas de changement fréquent).

7.3.4 Conception thermique

Dans un nœud de réseau, le système de refroidissement consomme beaucoup d'énergie, ce qui signifie que l'on peut réaliser des économies d'énergie en améliorant la conception du nœud sur le plan thermique. Ce sujet concerne également le cas de la présence de plusieurs nœuds dans un centre de données.

7.3.5 Serveur cache

Avec cette technique, des contenus sont mis en mémoire cache afin de réduire le trafic en double et non indispensable, sachant que plusieurs utilisateurs consomment le même contenu, ou qu'un utilisateur donné consomme plusieurs fois le même contenu. L'avantage de cette technique tient à une réduction de la largeur de bande. Son efficacité est avérée si la probabilité d'existence de la copie du contenu dans le serveur cache est forte. Le problème avec cette technique est que, si la probabilité est faible, le serveur doit exécuter fréquemment la tâche consistant à vérifier la

disponibilité du contenu puis à accéder au serveur d'origine. Compte tenu de la tâche supplémentaire et des serveurs supplémentaires, il se peut que la consommation d'énergie soit plus importante. Il faut donc commander le fonctionnement du serveur en tenant compte du nombre de consultations pour réduire la consommation d'énergie.

7.3.6 Filtrage

Cette technique bloque la transmission des données non indispensables ou non valides, comme les messages "keep-alive" excessifs ou les messages d'utilisateur en double. On peut aussi l'utiliser dans des systèmes de prévention des intrusions, également appelés systèmes de détection et de prévention des intrusions, afin de procéder activement à la prévention des intrusions ou au blocage des intrusions détectées, telles que les attaques par déni de service réparti (DDoS), moyennant le contrôle du trafic et/ou des activités dans le réseau à la recherche d'activités malveillantes. Les applications de cette technique permettent de réduire le trafic, et de réduire la consommation d'énergie correspondante qui était nécessaire au départ.

7.3.7 Serveur de notification d'indisponibilité

Il s'agit d'un serveur qui retourne une réponse de remplacement ou "une excuse" pour informer que le service demandé n'est pas disponible en raison, par exemple, d'un encombrement temporaire du réseau. En fonction de la réponse, il se peut que certains utilisateurs décalent dans le temps le trafic en période de pointe ou abandonnent leurs demandes, ce qui entraînera une réduction du trafic maximal et la réalisation d'économies d'énergie.

Pour compléter le tableau, il convient de spécifier aussi les mesures prises par l'entité qui reçoit le message. Par exemple, l'entité ne peut pas renvoyer la demande pendant une durée spécifiée.

7.3.8 Mise en forme

Il s'agit d'une technique qui commande le débit de sortie des paquets afin qu'il reste inférieur au débit potentiel de la liaison. La commande et la réduction du débit binaire maximal permettent d'économiser l'énergie des nœuds suivants, qui sont exploités en fonction du débit de données maximal. Le principal problème avec cette technique est qu'elle est susceptible d'augmenter le temps de transmission en raison de la file d'attente.

7.3.9 Stations de base (BTS) compactes

Il s'agit de stations de base permettant de réduire la consommation d'énergie et les coûts. A la différence des stations de base au sol et des stations de base réparties existantes, les stations de base compactes n'ont besoin ni d'abri au sol ni de système de refroidissement, de sorte qu'elles consomment moins d'énergie, qu'elles sont meilleur marché, et que leurs coûts d'installation sont moins élevés. De plus, elles peuvent être dotées d'équipements très performants, par exemple de plusieurs antennes par secteur avec entrées multiples et sorties multiples (MIMO, *multiple input multiple output*), et conformation du faisceau [b-Fili].

7.3.10 Techniques d'antennes intelligentes

Les techniques d'antennes intelligentes, telles que MIMO, sont des algorithmes intelligents de traitement du signal utilisant des réseaux d'antennes à la fois au niveau de l'émetteur et au niveau du récepteur qui améliorent la qualité des communications sans fil. Etant donné qu'elles permettent de commander la directivité de la réception ou de l'émission d'un signal et de réduire le brouillage des autres signaux, elles peuvent accepter des débits de données plus élevés pour le même bilan de puissance à l'émission et les mêmes caractéristiques en termes de taux d'erreurs sur les bits que les débits acceptés par un système à entrée unique et sortie unique (SISO, *single-input single-output*). Par exemple, les techniques d'émission en coopération, selon lesquelles plusieurs stations de base coopèrent entre elles et émettent un seul ou plusieurs flux MIMO au terminal en utilisant la même bande de fréquences, promettent de meilleures efficacités d'utilisation du spectre grâce à une augmentation du rapport signal sur brouillage et bruit (SINR, *signal to interference and noise ratio*).

En particulier, les systèmes d'antenne répartis permettent d'élargir la couverture du réseau disponible à proximité ou à l'intérieur des zones de couverture des cellules qui se chevauchent. Ces techniques d'antennes intelligentes permettent de réaliser des économies d'énergie dans les réseaux sans fil [b-ATIS][b-Cui].

7.3.11 Station relais

Une station relais est un émetteur qui relaie ou répète le signal d'une autre station de base vers une zone non couverte par le signal de la station d'origine. Dans les réseaux sans fil, la station relais améliore la performance et elle est également une source potentielle d'économie d'énergie car un plus grand nombre de connexions entre le nœud d'origine et le nœud de destination sont établies et les données peuvent être acheminées via plusieurs liaisons sans fil grâce aux nœuds relais. Les évanouissements étant indépendants de la liaison, les gains de diversité et l'efficacité d'utilisation du spectre peuvent être améliorés. La durée nécessaire pour transmettre une certaine quantité de données est donc réduite, ce qui permet de consommer moins d'énergie.

7.4 Techniques au niveau du réseau

7.4.1 Commutation de circuits et commutation de salves

D'une manière générale, la commutation de circuits consomme moins d'énergie que la commutation par paquets car son mécanisme est simple et n'a pas besoin de mémoires consommant de l'énergie telles que les mémoires SRAM et CAM, qui sont principalement utilisées pour le routage des paquets. Encore maintenant, le routage des paquets peut représenter 37% de la consommation d'énergie totale des routeurs [b-Baliga]. Autrement dit, la commutation de circuits permet d'économiser de l'énergie car elle n'a pas besoin de fonctions de routage des paquets. La commutation de circuits est particulièrement efficace pour le trafic en continu (transmission de vidéos en continu par exemple), qui devrait augmenter considérablement dans l'avenir. Le problème avec cette technique est qu'elle ne permet pas de réaliser un multiplexage statistique au niveau des paquets, ce qui risque de dégrader l'utilisation des liaisons et donc l'efficacité énergétique du réseau. En effet, avec la commutation de circuits, chaque connexion occupe la ligne. Même en cas d'écoulement clairsemé du trafic dans une connexion, la ressource restante ne peut pas être utilisée par d'autres connexions.

La commutation de salves permet aussi de consommer moins d'énergie dans les routeurs centraux. Cette technique consiste à agréger les paquets en salves de données dans les routeurs périphériques. L'utilisation de salves permet alors de réduire les opérations de calcul d'en-tête de paquet dans les routeurs centraux [b-Kim]. Une variante de la commutation de salves utilisée dans les réseaux optiques, à savoir la commutation optique de salves, vise à améliorer l'utilisation du réseau grâce au multiplexage statistique. Cette technique consiste à utiliser un paquet de commande pour réserver une certaine largeur de bande pour les salves avant leur transmission. Elle est plus efficace en termes d'utilisation de largeur de bande que la commutation optique de circuits car la durée d'établissement est nettement plus courte. De plus, par rapport au cas de la commutation optique par paquets, le nombre d'opérations de traitement et la consommation d'énergie dans le réseau central sont nettement réduits [b-Peng]. Le problème avec cette technique est que la qualité de fonctionnement du réseau est affectée par le mécanisme d'assemblage des salves.

7.4.2 Routage et ingénierie du trafic basés sur la consommation d'énergie

Il s'agit d'une technique de routage/ingénierie du trafic qui commande intentionnellement la route empruntée par le trafic afin de réduire autant que possible la consommation d'énergie dans le réseau tout entier. Cette technique peut comporter certaines fonctionnalités de traitement du trafic telles que l'agrégation de trafic, le routage sur plusieurs trajets et le codage dans le réseau. Pour cette technique, on suppose que les fonctions de mode veille ou ALR/DVS décrites au § 7.3 sont disponibles dans les nœuds de réseau. Lorsque la fonction de mode veille est disponible, cette technique agrège le trafic sur un ensemble limité de routes, et permet aux nœuds ou liaisons non

utilisés d'être en mode veille afin de ne pas consommer de l'énergie inutilement. Lorsque la fonction ALR/DVS est disponible, cette technique répartit le trafic sur plusieurs routes de manière à ce que chaque nœud traite le moins de trafic possible, et maintient le débit de liaison ou la tension au niveau approprié afin de ne pas consommer de l'énergie inutilement. Le problème avec cette technique concerne la question de savoir comment traiter la dynamique du trafic.

Lorsque la fonction de codage dans le réseau est disponible, cette technique réduit le nombre de paquets transmis en codant différents paquets dans un même paquet dans des nœuds de réseau intermédiaires. Par conséquent, une réduction de la consommation d'énergie est possible [b-Nagajothy]. Cette technique peut être cruciale dans les réseaux de capteurs sans fil.

7.4.3 Protocole simple

Cette technique vise à déterminer l'utilisation d'un protocole conjointement avec les protocoles des autres couches et à optimiser son utilisation afin de simplifier le traitement d'ensemble assuré par les protocoles dans un réseau. Elle comporte une procédure de simplification du protocole considéré. En règle générale, il existe deux approches. L'une consiste à transférer le trafic de données par les couches inférieures, ce qui est généralement plus simple. Cette approche peut s'appliquer à une zone dédiée, par exemple un réseau central. L'autre approche consiste à simplifier le protocole ou son utilisation. Dans la première approche, une commutation par étiquette, par exemple la commutation par étiquette multiprotocole (MPLS, *multi-protocol label switching*), est exécutée dans la couche IP. La deuxième approche repose sur la convergence, à savoir l'extension de la capacité IP d'un réseau d'accès au réseau de raccordement associé afin d'utiliser un réseau tout IP comme plate-forme commune [b-ATIS], un protocole TCP modifié avec amélioration de l'algorithme de retransmission, et le protocole de commande et de configuration des points d'accès sans fil (CAPWAP, *control and provisioning of wireless access points*) qui réduit les données de service de signalisation pour le réseau local sans fil (WLAN, *wireless local area network*) [b-IETF CAPWAP]. Cette technique permet de réduire les fonctions inutiles dans les nœuds de réseau et, par conséquent, de réaliser des économies d'énergie.

7.4.4 Programmation de la transmission

Cette technique vise à réduire les tampons qui doivent être utilisés dans les nœuds de réseau. Elle commande le nombre de paquets transmis et le rythme de transmission des paquets afin de réduire autant que possible le temps d'attente à la sortie de chaque nœud et, par conséquent, d'utiliser moins de tampons et de consommer moins d'énergie. Le problème avec cette technique est que le taux de perte de paquets se dégrade si la commande ne respecte pas la capacité nominale des tampons. En cas d'échec de la programmation, de multiples paquets arriveront dans un nœud, et leur nombre risquera de dépasser la capacité nominale du tampon. Pour éviter toute perte de paquets, des ressources de réseau supplémentaires pour la programmation de la transmission pourront donc être nécessaires à l'extérieur du nœud cible. La différence avec la mise en forme (§ 7.3.8) est que la mise en forme est utilisée de manière autonome dans un nœud afin de réduire le trafic maximal qui le traverse, tandis que la programmation de la transmission est utilisée en coopération entre de multiples nœuds afin de commander le rythme de transmission des paquets dans chaque nœud et d'éviter tout encombrement à l'intérieur du réseau.

7.4.5 Réseau de fourniture de contenu (CDN)

Il s'agit d'un réseau optimisé conçu expressément pour la fourniture de contenus. Un réseau CDN optimisé permet d'accéder à un serveur plus proche que le serveur initial, ce qui permet d'économiser des ressources en termes de largeur de bande et de distance et, par conséquent, de consommer moins d'énergie [b-Klein]. Le problème avec cette technique est le même que dans le cas du serveur cache: si le nombre de consultations est faible, cette technique est moins efficace.

7.4.6 Décalage de trafic en période de pointe

Cette technique décale dans le temps autant que possible la transmission du trafic en période de pointe. Elle permet de réduire le trafic maximal à prendre en charge et, par conséquent, de réduire la consommation d'énergie totale. L'une des méthodes consiste à distribuer les contenus très consultés dans les principaux serveurs caches à l'avance, pendant les heures creuses.

7.4.7 Conception de petites cellules

Cette technique consiste à mettre en place des cellules plus petites (microcellules, picocellules ou femtocellules) dans les endroits où la demande de services mobiles est forte, par exemple dans les centres-villes, les centres commerciaux, les aéroports, les campus et les grands espaces de bureaux, afin de diminuer la charge de trafic des macrocellules. La perte de puissance sur un canal sans fil étant fonction de la distance de propagation d^α , où α est l'exposant d'affaiblissement sur le trajet, il est évident que la puissance nécessaire pour transmettre le trafic de données est moins élevée pour une petite cellule que pour une macrocellule. Ainsi la transmission d'un signal radioélectrique consomme moins d'énergie dans le cas des petites cellules. Toutefois, si on prend aussi en considération la puissance statique, la puissance utilisée par les circuits et la puissance nécessaire au refroidissement du site en plus de la puissance de transmission, un système de petites cellules n'est pas toujours efficace sur le plan énergétique [b-Chen-a], de sorte que la solution la plus efficace sur le plan énergétique consiste à combiner des macrocellules et des microcellules sur la base d'une mesure réaliste de la consommation d'énergie afin d'optimiser la planification des cellules. Par ailleurs, des techniques de conception de petites cellules sont généralement mises en œuvre dans les stations de base compactes décrites au § 7.3.9 avec des macrostations de base, pour former des réseaux cellulaires superposés [b-SCELL][b-INST].

De plus, un système de petites cellules a pour avantage potentiel de permettre à la station de base d'adapter le fonctionnement à son environnement de manière plus précise et plus dynamique que dans le cas des grandes cellules. Pour cette adaptation, le système de petites cellules peut utiliser des algorithmes économes en énergie comme la désactivation en fonction de la couverture, qui permet à une station de base de détecter la couverture spatiale en cours par les autres stations et d'arrêter son activité, et le mode veille en fonction du trafic, qui détecte l'activité des équipements d'utilisateur par reniflage des porteuses, et désactive temporairement les petites cellules au repos [b-Claussen]. A titre d'exemple, on peut citer les femtocellules, qui sont de petites stations de base domestiques consommant peu d'énergie et peu onéreuses. En raison de leur petite taille, les femtocellules offrent les avantages suivants: amélioration de la couverture à l'intérieur pour la voix et les données, réduction considérable de la puissance d'émission, augmentation de l'autonomie des batteries des portables, et augmentation du rapport signal sur brouillage et bruit [b-Badic]. La réduction de la consommation d'énergie est expliquée de manière plus détaillée dans [b-Grant].

7.4.8 Planification du réseau prenant en compte la consommation d'énergie

Cette technique a trait à la conception et à la planification d'un réseau tout entier, qu'il soit filaire ou sans fil. Jusqu'à présent, la planification d'un réseau reposait généralement sur des critères de performance et de fiabilité, sans accorder beaucoup d'importance à l'amélioration de l'efficacité énergétique et à la réduction de l'impact sur l'environnement. Il faut maintenant en tenir compte. A cet effet, il convient de collecter divers types d'informations telles qu'un rapport de consommation d'énergie, en plus des informations traditionnelles telles que les rapports de panne dans le réseau (par exemple, nombre de pertes, durée de panne).

La planification du réseau prenant en compte la consommation d'énergie comporte une approche statique et une approche dynamique. La planification statique a lieu avant l'exploitation (lors de la conception du réseau). Elle vise à construire un réseau physique et à définir une politique de routage de manière à ce que la consommation d'énergie totale soit la plus faible possible, sur la base de l'estimation préalablement définie du trafic maximal. Quant à la planification dynamique, elle a lieu lors de l'exploitation et vise à rerouter le flux de trafic existant ou à répartir un nouveau flux de

trafic supplémentaire de manière à ce que la consommation d'énergie totale soit la plus faible possible, sur la base du trafic existant mesuré et du nouveau trafic demandé. Les deux approches sont importantes pour consommer le moins possible d'énergie dans le réseau. Conformément à [b-Chabarek], la planification du réseau prenant en compte la consommation d'énergie peut donner lieu à d'importantes économies d'énergie. Pour la planification dynamique d'un réseau sans fil, on peut par exemple utiliser le zoomage de cellule, qui consiste à adapter la taille de la cellule en fonction de la fluctuation de la charge de trafic et des besoins des utilisateurs. On peut l'utiliser pour répartir la charge en transférant une partie de la charge d'une cellule très chargée vers des cellules peu chargées ou pour réaliser des économies d'énergie en zoomant vers zéro lorsque la charge de trafic de la cellule est suffisamment faible [b-Zhisheng].

8 Considérations relatives à la réalisation d'économies d'énergie

On commence par décrire au § 8.1 le domaine ciblé pour la réalisation d'économies d'énergie. Sur la base de cette description, des considérations sont ensuite présentées concernant la voie à suivre pour réaliser des économies d'énergie compte tenu du principe des techniques énumérées dans les paragraphes précédents.

8.1 Domaine ciblé par la présente Recommandation

- "Réseaux futurs verts" ou "passage au vert grâce aux réseaux futurs"

La présente Recommandation se limite "réseaux futurs verts" (§ 6.1).

- Etapes du cycle de vie

La présente Recommandation se limite à l'étape d'utilisation (§ 6.2).

Cette étape comporte la phase avant exploitation et la phase d'exploitation. Dans la phase avant exploitation, à savoir lors de la conception du réseau, on s'intéresse à l'aspect statique, c'est-à-dire à la question de savoir comment réduire le plus possible la quantité de ressources de réseau à prévoir pour la demande de trafic donnée. Dans la phase d'exploitation, à savoir lors de l'exploitation du réseau, on s'intéresse à l'aspect dynamique, c'est-à-dire à la question de savoir comment utiliser une quantité moindre de ressources de réseau en fonction du trafic à un moment donné.

- Niveaux des techniques

Pour les techniques, la présente Recommandation considère trois niveaux (niveau des dispositifs, niveaux des équipements et niveau du réseau).

Chaque technique n'est pas isolée, mais interagit avec d'autres à différents niveaux. L'objectif est de trouver une solution globale, qui intègre des techniques de chaque niveau.

- Type de méthodes à utiliser pour réaliser des économies d'énergie

La présente Recommandation se limite aux méthodes techniques.

Il existe diverses méthodes, reposant chacune sur une approche différente. Certaines sont techniques, d'autres non. Comme exemple type de méthode non technique, on peut citer la réglementation, qui accorde une certaine durée d'utilisation des réseaux à chaque groupe d'utilisateurs prédéfini. Les deux types de méthodes, techniques et non techniques, sont importants, mais comme la présente Recommandation est une Recommandation technique, elle se limite aux méthodes techniques.

8.2 Méthodes à utiliser pour réaliser des économies d'énergie

Les méthodes à utiliser pour réaliser des économies d'énergie, décrites ci-après aux § 8.2.1 et 8.2.2, sont déduites du principe des techniques énumérées dans les paragraphes précédents. Elles seront utiles lors de l'examen de la combinaison appropriée de techniques à utiliser pour obtenir des avantages plus importants.

- Réduction de la capacité de réseau requise (§ 8.2.1)
 - Réduire le volume de trafic dans tout le réseau (§ 8.2.1.1).
 - Décaler le trafic en période de pointe, ce qui permet de réduire la capacité maximale (§ 8.2.1.2).
- Amélioration de l'efficacité énergétique du réseau (§ 8.2.2)
 - Commander le fonctionnement des dispositifs/équipements en fonction de la dynamique du trafic (§ 8.2.2.1).
 - Transmettre le trafic en utilisant moins d'énergie (§ 8.2.2.2).

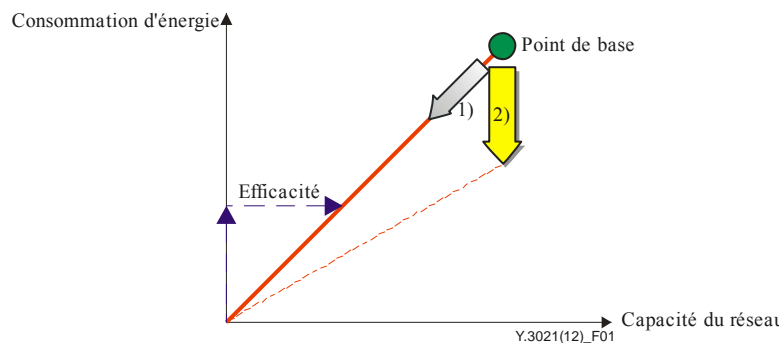


Figure 1 – Consommation d'énergie en fonction de la capacité du réseau

8.2.1 Réduction de la capacité de réseau requise

C'est une méthode basée sur la quantité de trafic. Lorsque le trafic diminue, les ressources et la capacité de réseau requises sont réduites, ce qui permet de réduire la consommation d'énergie. Cet effet est représenté sur la Figure 1 par une flèche en direction de l'origine.

8.2.1.1 Réduction du volume de trafic dans tout le réseau

C'est une méthode statique, qui vise à réduire le volume de trafic devant être transmis par les dispositifs ou les équipements. Un exemple consiste à installer une mémoire cache à l'entrée des réseaux (pour qu'elle soit plus proche de l'utilisateur) afin de réduire les ressources de réseau correspondantes pour le contenu fréquemment consulté.

8.2.1.2 Décalage du trafic en période de pointe

Le décalage du trafic en période de pointe permet de réduire la capacité maximale. C'est une méthode dynamique. Une partie de la consommation d'énergie des dispositifs ou des équipements dépend essentiellement de la quantité maximale de trafic qui peut être traitée. Ainsi, si on peut réduire le trafic maximal, on réduira aussi la consommation d'énergie. L'objectif de cette méthode est de décaler dans le temps la transmission de données afin de diminuer le trafic en période de pointe. Un exemple consiste à programmer la distribution des contenus très consultés à des serveurs caches situés à proximité des utilisateurs, à l'avance pendant les heures creuses.

8.2.2 Amélioration de l'efficacité énergétique du réseau

Dans cette méthode, qui est axée sur l'efficacité énergétique du réseau, on suppose que la capacité de réseau requise reste la même. L'effet est représenté sur la Figure 1 par une flèche indiquant une réduction de la consommation d'énergie. Cette méthode nécessite de prendre en compte l'architecture à différents niveaux. L'efficacité énergétique du réseau est généralement définie comme étant le débit du réseau divisé par l'énergie consommée, c'est-à-dire en bits par

seconde/Watt, et elle est exprimée ici pour une capacité de réseau qui est équivalente au débit maximal. Ainsi, si on peut améliorer l'efficacité énergétique du réseau d'une manière ou d'une autre, par exemple en faisant évoluer les dispositifs (microfabrication de circuits LSI basée sur la loi de Moore, etc.), il en résultera une réduction de la consommation d'énergie totale.

8.2.2.1 Commande du fonctionnement des dispositifs/équipements en fonction de la dynamique du trafic

C'est une méthode dynamique. Les dispositifs ou équipements de réseau existants fonctionnent généralement à pleine capacité et à plein débit indépendamment des fluctuations du trafic. Cette méthode permet de commander le fonctionnement des dispositifs ou des équipements en fonction de la fluctuation du trafic. On peut citer comme exemple la commande du mode veille.

8.2.2.2 Transmission du trafic en utilisant moins d'énergie

C'est une méthode statique. Actuellement, la transmission de données fait généralement intervenir des protocoles complexes dans plusieurs couches. L'objectif de cette méthode est de transmettre les données moyennant un mécanisme simplifié utilisant les couches basses, des protocoles simples, etc. On peut citer comme exemple un réseau optique avec une moins grande intervention de l'électricité.

Pour mesurer l'efficacité énergétique dans un réseau, il faut bien choisir la cible (service, équipement, etc.) et la période. Comme décrit au § 3.2.2, l'efficacité est définie comme étant le débit du réseau divisé par l'énergie consommée (généralement en bits/s/W). Le problème est que le débit en bits/s est étroitement lié à la nature des services et varie dans le temps, ce qui conduit à différentes valeurs d'efficacité en bits/s/W. Il est donc nécessaire de choisir la cible et la période pour mesurer l'efficacité de manière appropriée compte tenu des propriétés du service, de l'utilisateur (par exemple de bout en bout ou un sous-réseau particulier), etc.

Les § 8.3 et 8.4 traitent de manière plus détaillée des méthodes décrites aux § 8.2.1 et 8.2.2 et indiquent comment utiliser dans la pratique les différentes techniques.

8.3 Commande du fonctionnement des dispositifs/équipements en fonction de la dynamique du trafic

Les techniques reposant sur la dynamique du trafic comprennent la commande du mode veille et le réglage dynamique de la tension (DVS). La commande du mode veille permet d'économiser de l'énergie en mettant en "mode veille" un dispositif lorsqu'il n'est pas utilisé, et le réglage DVS consiste à réduire la capacité de transmission de trafic de dispositifs tels que les processeurs, les cartes de ligne et les cartes d'interface de réseau (NIC) lorsque le volume de trafic est faible. Les économies d'énergie réalisées à l'aide de ces techniques sont d'autant plus importantes que les nœuds de réseau en mode veille ou à tension réduite sont plus nombreux. C'est la raison pour laquelle la commande du mode veille et le réglage DVS sont efficaces lorsqu'ils sont appliqués à des réseaux caractérisés par un grand nombre de dispositifs – probablement pour assurer une large couverture, une demande de trafic élevée en période de pointe mais un volume de trafic faible en moyenne et, par conséquent, un faible taux d'utilisation des dispositifs. S'agissant de la commande du mode veille, comme indiqué au § 7.3.1, un problème concerne la question de savoir comment traiter le faible trafic de commande comme les informations de routage. Une solution peut consister à utiliser un "proxy". S'agissant du réglage DVS, comme indiqué au § 7.3.2, un problème concerne la question de savoir comment traiter le trafic par salves.

Du point de vue de la dynamique du trafic, le trafic Internet est caractérisé par une variabilité temporelle et spatiale dynamique. En revanche, la consommation d'énergie des routeurs est pratiquement indépendante du volume instantané de trafic transmis. Par conséquent, la mise des routeurs en mode veille lorsqu'aucun trafic ne circule dans lesdits routeurs permet de réaliser des économies d'énergie. Toutefois, dans la situation présente, les trajets sur lesquels le trafic est distribué pour transmission dans le réseau sont prédéfinis par les protocoles de routage ou d'autres

méthodes, ce qui signifie que du trafic circule dans chaque routeur même lorsque le volume global de trafic est faible, d'où la nécessité de maintenir chaque routeur en fonctionnement en permanence. Ainsi, se pose clairement un problème technique concernant la question de savoir comment commander les trajets de trafic dans un réseau tout entier de manière à permettre aux routeurs de passer en mode veille.

8.4 Transmission du trafic en utilisant moins d'énergie

Parmi les techniques destinées à réduire la consommation d'énergie figurent l'utilisation de circuits LSI et l'utilisation de nœuds de réseau optiques. L'utilisation de circuits LSI permet de réduire la tension de commande, d'où la possibilité de réaliser des économies d'énergie. L'utilisation de nœuds de réseau optiques permet d'accroître considérablement la capacité de transport et d'améliorer nettement l'efficacité énergétique des réseaux, même s'il faut procéder à une agrégation du trafic pour pouvoir maximaliser la capacité potentiellement élevée. Ce sont des techniques au niveau des dispositifs, qui ont été envisagées directement pour la réalisation d'économies d'énergie jusqu'à présent. En parallèle, les techniques possibles au niveau des équipements et celles au niveau du réseau n'ont généralement pas été recensées, mais elles pourront permettre de réaliser des économies d'énergie dans l'avenir.

Du point de vue de la technique de transmission, les réseaux IP, en particulier l'Internet, utilisent la commutation par paquets, qui permet de prendre en charge efficacement de multiples applications grâce au multiplexage statistique. Mais le problème est que les nouvelles augmentations du débit et de la capacité des lignes de transmission dans l'avenir nécessiteront d'améliorer les performances de types particuliers de mémoires à haut débit, de grande capacité et, par conséquent, consommant beaucoup d'énergie, comme les mémoires vives statiques (SRAM, *static random access memory*) et les mémoires adressables par le contenu (CAM, *content addressable memory*) pour la mise en tampon et le routage. Toutefois, le trafic vidéo, qui devrait augmenter dans l'avenir, est caractérisé par la génération continue d'informations dans un sens, la session associée au trafic vidéo restant la même et des décisions de routage étant requises uniquement pour chaque session. Cette caractéristique permet de ne pas avoir besoin de mémoire CAM, destinée au départ à être utilisée pour le routage paquet par paquet et adaptée au trafic hétérogène. Se passer d'un tel dispositif qui consomme beaucoup d'énergie offre une véritable possibilité, sur le plan technique, de réaliser des économies d'énergie. Par conséquent, l'un des défis techniques à relever est de concevoir un nouveau mécanisme de transmission qui ne nécessite pas de recourir à ces types de mémoires aux coûts élevés.

8.5 Classement des différentes techniques

Les différentes techniques sont classées en fonction du niveau et de la méthode associés, comme indiqué dans le Tableau 1.

Tableau 1 – Classement des techniques

Technique au niveau	Réduction de la capacité (§ 8.2.1)		Amélioration de l'efficacité énergétique (§ 8.2.2)	
	Réduction du trafic (§ 8.2.1.1)	Décalage du trafic en période de pointe (§ 8.2.1.2)	Commande dynamique (§ 8.2.2.1)	Moins d'énergie (§ 8.2.2.2)
Des dispositifs			<ul style="list-style-type: none"> – Processeur multicoeur – Coupure de signal d'horloge – Mémoire virtuelle prenant en compte l'énergie 	<ul style="list-style-type: none"> – Circuits LSI – Amplificateur de puissance évolué
Des équipements	<ul style="list-style-type: none"> – Serveur cache – Filtrage 	<ul style="list-style-type: none"> – Serveur de notification d'indisponibilité – Mise en forme 	<ul style="list-style-type: none"> – Commande de mode veille – ALR/DVS 	<ul style="list-style-type: none"> – Nœud optique – Conception thermique – Stations de base (BTS) compactes – Techniques d'antennes intelligentes – Station relais
Du réseau	<ul style="list-style-type: none"> – CDN 	<ul style="list-style-type: none"> – Décalage de trafic en période de pointe 	<ul style="list-style-type: none"> – Routage/ ingénierie du trafic – Planification du réseau prenant en compte l'énergie (dynamique) 	<ul style="list-style-type: none"> – Commutation de circuits/salves – Protocole simple – Programmation de la transmission – Conception de petites cellules – Planification du réseau prenant en compte l'énergie (statique)

Bien que ces techniques soient toutes utiles pour réaliser des économies d'énergie, leur description montrant quelles économies d'énergie devraient pouvoir être réalisées dans les réseaux, les difficultés que posent la réalisation d'économies d'énergie et la réduction d'énergie sont très différentes d'une technique à l'autre. Des études complémentaires sont nécessaires pour déterminer parmi ces techniques, celles qui devraient être obligatoires et celles qui devraient être facultatives dans les réseaux futurs. Dans la présente Recommandation, on ne donne aucune spécification en la matière et on suppose que ces techniques sont toutes facultatives.

9 Fonctions possibles et leurs interactions

9.1 Fonctions possibles

D'après le paragraphe 8 "Considérations relatives à la réalisation d'économies d'énergie", la réalisation d'économies d'énergie dans les réseaux repose à la fois sur des méthodes statiques et des méthodes dynamiques. Les méthodes statiques visent à prévoir avant l'exploitation (lors de la conception) de construire un réseau avec des techniques à faible consommation d'énergie aux niveaux des dispositifs, des équipements et du réseau, et à minimaliser la consommation d'énergie totale pour le trafic maximal supposé. Quant aux méthodes dynamiques, elles visent à adapter lors de l'exploitation l'utilisation des techniques aux niveaux des dispositifs, des équipements et du réseau en fonction des variations du trafic réel, et à minimaliser la consommation d'énergie totale en fonction de cette dynamique.

Au niveau statique, la réalisation d'économies d'énergie devrait reposer sur les techniques associées aux trois niveaux décrites comme étant des processus de contrôle de l'énergie lors de la construction du réseau. Au niveau dynamique, la réalisation d'économies d'énergie en général devrait reposer sur des processus de gestion, consistant à collecter les états en cours, à les analyser et à suivre des procédures améliorées ciblées sur un fonctionnement optimisé. Des processus de gestion peuvent être recensés à chacun des niveaux associés aux techniques, à savoir au niveau des dispositifs, au niveau des équipements et au niveau du réseau. Les processus de gestion peuvent être installés dans chaque nœud de réseau, ou dans un serveur de gestion de réseau qui supervise les différents équipements du réseau. Une coopération entre les différents niveaux de gestion est bien évidemment nécessaire pour pouvoir réaliser des économies d'énergie à l'échelle du réseau. Outre les processus de gestion, une base de données contenant des informations relatives à l'énergie est nécessaire pour la gestion.

On indique ci-après des fonctions possibles qui peuvent être appliquées d'une manière générale quelles que soient les techniques utilisées pour réaliser des économies d'énergie. La Figure 2 illustre ces fonctions, ainsi qu'une base de données et leurs interactions.

- La fonction de contrôle et de mesure de l'énergie exécute les contrôles spécifiés par la fonction de gestion de l'énergie afin de réduire la consommation d'énergie, et obtient des données d'état mesurées. Elle est subdivisée en trois parties – au niveau des dispositifs, au niveau des équipements et au niveau du réseau.
- La fonction de gestion de l'énergie collecte les informations de base, calcule le mode de fonctionnement optimal et envoie des commandes à la fonction de contrôle et de mesure de l'énergie. Elle comporte trois sous-fonctions: collecte de données, optimisation et commande.
- La base de données d'état rassemble les informations de base sur le mode de fonctionnement en cours provenant de la fonction de contrôle et de mesure de l'énergie. Elle contient un ensemble de données d'état, par exemple en ce qui concerne la consommation d'énergie et le trafic.

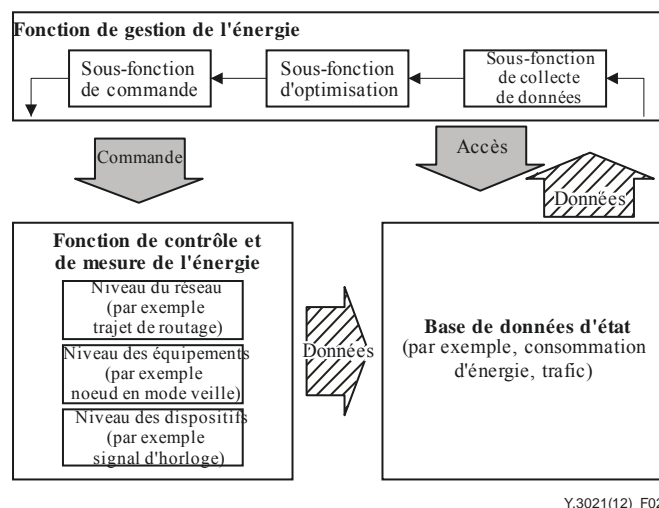


Figure 2 – Fonctions possibles

La Figure 2 est une figure logique. L'emplacement des fonctions et de la base de données dépend de l'équipement considéré.

9.1.1 Fonction de contrôle et de mesure de l'énergie

La fonction de contrôle et de mesure de l'énergie comporte un processus de contrôle et un processus de mesure.

Pour le contrôle, la fonction de contrôle et de mesure de l'énergie intègre diverses techniques économes en énergie décrites au § 7, qui sont réparties en techniques au niveau des dispositifs, techniques au niveau des équipements et techniques au niveau du réseau. On peut donner comme exemples pour chaque niveau la modification du signal d'horloge du dispositif, le passage d'un nœud en mode veille et la modification du trajet de routage, comme indiqué dans la Figure 2. Cette fonction est liée directement à la consommation d'énergie, et est commandée par la fonction de gestion de l'énergie.

En outre, à chaque niveau sont associées des techniques statiques et des techniques dynamiques. Les techniques statiques sont elles-mêmes des techniques autonomes en matière de réalisation d'économies d'énergie et elles ne sont pas affectées par des intrants externes, comme par exemple les circuits LSI et la conception thermique. Les techniques dynamiques sont contrôlées par des intrants externes, comme par exemple le passage d'un nœud en mode veille et le routage en fonction de l'énergie. Pour les techniques statiques, la consommation d'énergie est déterminée avant l'exploitation du réseau (lors de sa conception) et elle est constante. En revanche, pour les techniques dynamiques, la consommation d'énergie est contrôlée et optimisée lors de l'exploitation. Dans le cadre illustré dans la Figure 2, la fonction de contrôle et de mesure de l'énergie est utilisée à la fois lors de la phase statique et lors de la phase dynamique. Dans la phase statique (avant l'exploitation), la fonction de contrôle et de mesure de l'énergie met en œuvre des techniques aux trois niveaux sans interagir avec d'autres fonctions. Dans la phase dynamique (en cours d'exploitation), la fonction de contrôle et de mesure de l'énergie interagit avec d'autres fonctions.

Pour la mesure, la fonction de contrôle et de mesure de l'énergie intègre diverses techniques de mesure de l'énergie, qui peuvent être reliées aux techniques de contrôle de l'énergie dans chaque couche, et qui sont également réparties en techniques au niveau des dispositifs, techniques au niveau des équipements et techniques au niveau du réseau. On peut donner comme exemples de mesure à chaque niveau la fréquence, la durée de veille et l'utilisation de liaison.

En outre, si une modification des paramètres et de la méthode de mesure est nécessaire à la suite d'une décision de la fonction de gestion de l'énergie, la fonction de contrôle et de mesure de l'énergie est commandée par la fonction de gestion de l'énergie. Elle mémorise les données d'état mesurées dans la base de données d'état. Les paramètres et la méthode de mesure varient en fonction du type de techniques de contrôle de l'énergie utilisées dans le nœud ou le réseau.

9.1.2 Fonction de gestion de l'énergie

La fonction de gestion de l'énergie accède à la base de données d'état et commande la fonction de contrôle et de mesure de l'énergie afin de minimaliser la consommation d'énergie totale. Elle comporte les trois sous-fonctions suivantes:

Sous-fonction de collecte de données: collecte les données d'état nécessaires sur les nœuds de réseau auprès de la base de données d'état.

Sous-fonction d'optimisation: détermine quelle opération de gestion il convient d'appliquer à quel nœud de réseau afin de minimaliser la consommation d'énergie totale.

Sous-fonction de commande: envoie une commande à la fonction de contrôle et de mesure de l'énergie d'un nœud de réseau.

9.1.3 Base de données d'état

La base de données d'état est une base de données qui contient un ensemble de données d'état permettant de définir les caractéristiques applicables aux nœuds de réseau, par exemple en ce qui concerne la consommation d'énergie et le trafic.

9.2 Modèles de combinaison des fonctions

La Figure 3 présente des modèles de combinaison des fonctions recensées plus haut. Ces modèles sont au nombre de trois. Plus le modèle appliqué est vaste, plus les avantages attendus d'une optimisation globale associée à une optimisation locale sont importants. Ici, les traits pleins désignent des flux de signalisation (commande/surveillance/accès) et les traits en pointillés des flux de données.

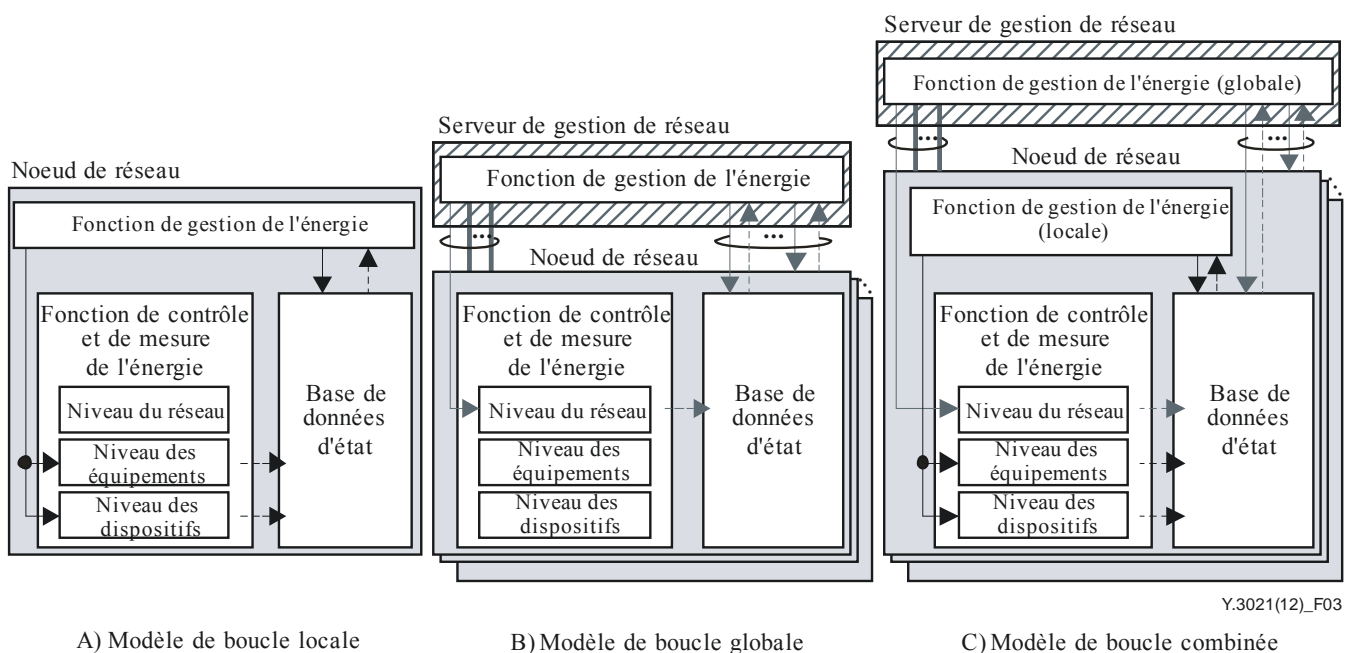


Figure 3 – Modèles de combinaison des fonctions pour réaliser des économies d'énergie

A) Modèle de boucle locale: il est généralement déployé sur un seul nœud de réseau, tel qu'un routeur ou un commutateur. Les deux fonctions principales et la base de données sont toutes présentes dans le nœud, qui comporte une boucle de contrôle locale fermée. La fonction de gestion de l'énergie envoie des commandes aux niveaux équipement et dispositif de la fonction de contrôle et de mesure de l'énergie, car ces niveaux sont exécutés dans un seul nœud. Cette boucle vise à permettre à chaque nœud d'assurer sa propre optimisation.

Comme exemple type de ce cas, on peut citer la commande du signal d'horloge du dispositif en fonction du trafic.

B) Modèle de boucle globale: il est généralement déployé sur plusieurs nœuds de réseau et un seul serveur de gestion de réseau. La fonction de contrôle et de mesure de l'énergie et la base de données d'état sont présentes dans chaque nœud de réseau, et la fonction de gestion de l'énergie est présente dans le serveur de gestion de réseau. La boucle de contrôle globale englobe les nœuds concernés et le serveur. La fonction de gestion de l'énergie envoie des commandes au niveau réseau de la fonction de contrôle et de mesure de l'énergie, car ce niveau est exécuté entre plusieurs nœuds. Pour cette boucle, on suppose que le serveur de gestion de réseau accède à plusieurs nœuds et les commande de manière centralisée.

Comme exemple de cette boucle, on peut citer le routage intentionnel qui choisit la route pour laquelle la consommation d'énergie est la plus faible.

C) Modèle de boucle combinée: il est généralement déployé sur plusieurs nœuds de réseau et un seul serveur de gestion de réseau. La fonction de contrôle et de mesure de l'énergie et la base de données d'état sont présentes dans chaque nœud de réseau, et la fonction de gestion de l'énergie est présente dans chaque nœud de réseau et dans le serveur de gestion de réseau. Les deux types de fonction de gestion de l'énergie, global et local, constituent deux boucles de contrôle qui, ensemble, forment une boucle de contrôle combinée. La fonction locale de gestion de l'énergie envoie des commandes aux niveaux équipement et dispositif de la fonction de contrôle et de mesure de l'énergie, car ces niveaux sont exécutés dans un seul nœud. La fonction globale de gestion de l'énergie envoie des commandes au niveau réseau de la fonction de contrôle et de mesure de l'énergie, car ce niveau est exécuté entre plusieurs nœuds. Dans ce modèle, le serveur de gestion de réseau accède à plusieurs nœuds et les commande de manière centralisée, et chaque nœud assure sa propre optimisation de manière répartie.

Comme exemple type de ce cas, on peut citer le routage basé sur l'énergie, selon lequel la boucle globale agrège les routes de trafic, et la boucle locale met le nœud en mode veille lorsqu'il n'y a pas de trafic.

10 Analyse des incidences de la réalisation d'économies d'énergie

Le présent paragraphe contient une analyse des incidences de la réalisation d'économies d'énergie dans les réseaux, en particulier sur les aspects liés à la qualité de fonctionnement. On commence par analyser les incidences sur la qualité de fonctionnement du réseau lorsque seules des techniques économes en énergie sont mises en œuvre (§ 10.1). On analyse ensuite les incidences sur la mise en place de services en se basant sur la consommation d'énergie lorsque des techniques économes en énergie sont mises en œuvre en même temps qu'un nouveau service mis en place (§ 10.2).

10.1 Incidences sur la qualité de fonctionnement du réseau

La mise en œuvre de techniques économes en énergie peut dégrader la qualité de fonctionnement du réseau, par exemple la qualité de service, et peut aussi avoir une incidence sur la sécurité.

D'un côté, les techniques économes en énergie peuvent utiliser des ressources ou des processus supplémentaires. D'un autre côté, elles peuvent réduire l'utilisation de ressources inutiles dans le temps et dans l'espace afin d'utiliser le moins de ressources possible, par exemple en termes d'équipements ou de largeur de bande. Dans les deux cas, la qualité de fonctionnement du réseau

risque d'être dégradée, ce qui peut entraîner davantage de retards, d'encombrements, de blocages de connexion, etc. Par exemple, la technique du mode veille permet de réduire la consommation d'énergie. Mais, si la durée nécessaire pour sortir du mode veille est longue, il peut en résulter un accroissement du retard pour la communication. Il est donc nécessaire d'éviter toute dégradation de la qualité de fonctionnement, ou de faire en sorte que cette dégradation reste dans les limites acceptables, qui sont généralement définies dans les accords de niveau de service (SLA). En d'autres termes, pour les techniques économes en énergie, il faut trouver un compromis entre les économies d'énergie réalisées et la dégradation de la qualité de fonctionnement. Toutefois, le niveau de dégradation acceptable dépend des services applicatifs ou des systèmes de réseau. A titre d'exemple, pour un service usuel de courrier électronique, on peut tolérer un retard de plusieurs secondes. Il faut donc recenser les incidences sur la qualité de fonctionnement du réseau et les examiner pour déterminer si la dégradation du service est tolérable et reste dans les limites acceptables.

Par conséquent, lors de l'application de techniques économes en énergie, il convient de faire en sorte que la dégradation de la qualité de fonctionnement du réseau, qui est causée par la mise en place de ces techniques, reste dans les limites acceptables pour les services concernés.

Pour clarifier ces incidences, on peut utiliser la loi de Shannon pour les relations entre, par exemple:

- l'efficacité de déploiement et l'efficacité énergétique;
- la largeur de bande et la puissance, uniquement pour un débit de données particulier;
- le retard et la puissance;
- l'efficacité d'utilisation du spectre et l'efficacité énergétique, uniquement pour une largeur de bande disponible particulière.

Ces relations sont inversement proportionnelles durant les phases de planification, d'exploitation et de gestion du réseau [b-Chen-b] [b-Li]. Il convient de prendre en considération ces relations de compromis si on veut réaliser des économies d'énergie tout en assurant une qualité de service garantie.

10.2 Incidences sur la mise en place de services

La mise en place d'un nouveau service, qui nécessite généralement des capacités et des ressources supplémentaires, peut entraîner une augmentation de la consommation d'énergie. La mise en place de techniques économes en énergie parallèlement à celle d'un service permet de limiter cette augmentation.

Avec la mise en place d'un service, le trafic augmente pour le service et des ressources supplémentaires sont nécessaires, d'où une augmentation de la consommation d'énergie totale. Mais si la mise en place d'un service s'accompagne de la mise en place de techniques économes en énergie, l'énergie totale consommée sera inférieure à celle initialement requise sans ces techniques. A titre d'exemple, dans le réseau cellulaire classique utilisant des macrocellules, il est possible d'établir des stations de base compactes avec des petites cellules ou des stations relais dans les zones urbaines, afin que le traitement du volume de trafic des nombreux utilisateurs nécessite moins d'énergie. En d'autres termes, les techniques économes en énergie permettent de limiter l'augmentation de la consommation d'énergie et d'améliorer l'efficacité. Il convient donc d'évaluer avec soin les avantages offerts par les techniques économes en énergie lors de la mise en place de nouveaux services. Si des techniques économes en énergie encore plus sophistiquées sont mises en place, la réduction de la consommation d'énergie pourra même être supérieure à l'augmentation due au trafic et aux ressources supplémentaires, auquel cas la consommation d'énergie totale baissera. Quoi qu'il en soit, lors de la mise en place de services, il convient de s'assurer que l'augmentation de la consommation d'énergie reste dans les limites acceptables.

Par conséquent, lors de la mise en place de services, il convient d'appliquer des techniques économes en énergie de manière telle que l'augmentation de consommation due à la mise en place simultanée de plusieurs services reste dans les limites acceptables, afin de continuer à respecter les exigences relatives aux différents services (par exemple en termes de retard, de perte, etc.).

11 Exigences de haut niveau

La réalisation d'économies d'énergie dans les réseaux permet aux réseaux, sur la base de leurs capacités et de leur exploitation, de consommer moins d'énergie que les réseaux existants. Il est recommandé de prendre en charge les éléments suivants:

1) Méthodes (§ 8.2)

- Pour la réalisation d'économies d'énergie dans les réseaux, il est recommandé de réduire le volume de trafic à transmettre par les dispositifs et les équipements.
- Pour la réalisation d'économies d'énergie dans les réseaux, il est recommandé de décaler le trafic en période de pointe, ce qui permet de réduire la capacité maximale.
- Pour la réalisation d'économies d'énergie dans les réseaux, il est recommandé de commander le fonctionnement des dispositifs/équipements en fonction des fluctuations du trafic.
- Pour la réalisation d'économies d'énergie dans les réseaux, il est recommandé de transmettre le trafic en utilisant moins d'énergie et ce, moyennant un mécanisme simplifié de transmission des données.

2) Fonctions (§ 9.1)

- Pour la réalisation d'économies d'énergie dans les réseaux, il est recommandé de prendre en charge une fonction de contrôle et de mesure de l'énergie, une fonction de gestion de l'énergie et une base de données d'état.
- Il est recommandé que la fonction de contrôle et de mesure de l'énergie exécute les contrôles spécifiés par la fonction de gestion de l'énergie afin de réduire la consommation d'énergie, et mesure la consommation d'énergie. Il est recommandé d'inclure des techniques au niveau des dispositifs, au niveau des équipements et au niveau du réseau.
- Il est recommandé que la fonction de gestion de l'énergie collecte les informations de base, calcule le mode de fonctionnement optimal et envoie des commandes à la fonction de contrôle et de mesure de l'énergie. Il est recommandé d'inclure les sous-fonctions de collecte de données, d'optimisation et de commande.
- Il est recommandé que la base de données d'état rassemble les informations de base sur le mode de fonctionnement en cours provenant de la fonction de contrôle et de mesure de l'énergie, par exemple en ce qui concerne la consommation d'énergie et le trafic.

3) Incidences sur la qualité de fonctionnement du réseau (§ 10)

- Lors de la mise en place de techniques économes en énergie, il est recommandé de les appliquer de manière telle que la dégradation de la qualité de fonctionnement du réseau (due à leur mise en place) reste dans les limites acceptables pour les services.
- Lors de la mise en place de services, il est recommandé d'appliquer des techniques économes en énergie de manière telle que l'augmentation de la consommation due à la mise en place simultanée de plusieurs services reste dans les limites acceptables, afin de continuer à respecter les exigences relatives aux différents services (par exemple en termes de retard, de perte, etc.).

12 Considérations liées à l'environnement

La présente Recommandation passe en revue les techniques économes en énergie pour les réseaux futurs et analyse leurs incidences, afin de permettre la réalisation d'économies d'énergies dans les réseaux à l'avenir.

13 Considérations liées à la sécurité

Dans la présente Recommandation, les techniques économes en énergie sont examinées à plusieurs niveaux, à savoir aux niveaux des dispositifs, des équipements et du réseau. Les interactions cycliques entre les principales fonctionnalités sont identifiées afin de définir le cadre de la réalisation d'économies d'énergie lors de la construction et de l'exploitation des réseaux.

Les techniques statiques ne devraient pas entraîner de risques supplémentaires pour la sécurité car elles n'interagissent pas avec l'extérieur. En revanche, les techniques dynamiques risquent de poser des problèmes de sécurité car elles sont gérées par des fonctions extérieures. Il convient d'examiner les risques que la mise en place de techniques économes en énergie est susceptible d'entraîner afin de réduire ces risques.

En ce qui concerne les interactions cycliques entre les principales fonctionnalités, il convient d'examiner la question de savoir comment maintenir un fonctionnement stable, question qui concerne de manière générale les mécanismes utilisant un bouclage. Etant donné que cette question dépend des paramètres de fonctionnement des interactions cycliques, il convient de choisir avec soin les paramètres. D'autres éléments devraient être pris en considération pour la mise en place de chaque système particulier.

Etant donné que certaines techniques font intervenir une suspension des procédures (mode veille par exemple), le temps de réponse à une demande de l'utilisateur peut être différent du temps observé en fonctionnement normal. La présente Recommandation invite à noter que la dégradation de la qualité de fonctionnement devrait rester dans les limites acceptables, en particulier en ce qui concerne les télécommunications pour la sécurité du public et dans les situations d'urgence.

Bibliographie

- [b-UIT-T G.992.3] Recommandation UIT-T G.992.3 (2009), *Emetteurs-récepteurs de ligne d'abonné numérique asymétrique 2*.
- [b-UIT-T G.992.5] Recommandation UIT-T G.992.5 (2009), *Emetteurs-récepteurs de ligne d'abonné numérique asymétrique 2 – ADSL2 à largeur de bande étendue (ADSL2plus)*.
- [b-UIT-T G.997.1] Recommandation UIT-T G.997.1 (2009), *Gestion de couche physique pour les émetteurs-récepteurs de ligne d'abonné numérique*.
- [b-ATIS] ATIS 2010, *ATIS Report on wireless network energy efficiency*.
- [b-IETF RFC 5412] IETF RFC 5412 (2010), *Lightweight access point protocol*.
- [b-BBFORUM] Broadband forum TR-202 (2010), *ADSL2/ADSL2plus low-power mode guidelines*, issue 1.
- [b-IEEE P802.3az] IEEE P802.3az Energy efficient Ethernet Task Force.
<<http://www.ieee802.org/3/az/index.html>>
- [b-IETF CAPWAP] IETF CAPWAP Working Group
<<http://www.ietf.org/html.charters/capwap-charter.html>>
- [b-Badic] Badic, B. *et al.* (2009), *Energy efficient access architectures for green radio: large versus small cell size deployment*, *Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2009-Fall)*, IEEE, April, pp. 1-5.
- [b-Baliga] Baliga, J. *et al.* (2007), *Photonic switching and the energy bottleneck*, *IEEE Photonics in Switching*, August, pp. 125-126.
- [b-Chabarek] Chabarek, J. *et al.* (2008), *Power awareness in network design and routing*, *INFOCOM 2008*, IEE, April, pp. 457-465.
- [b-Chen-a] Chen, Y. *et al.* (2010), *Characterizing energy efficiency and deployment efficiency relations for green architecture design*, IEEE, *International Conference on Communications Workshops (ICC)*.
- [b-Chen-b] Chen, Y. *et al.* (2011), *Fundamental trade-offs on green wireless networks*, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 49, No. 6, pp. 30-37.
- [b-Claussen] Claussen, H., Ashraf, I. and L.T.W. Ho (2010), *Dynamic idle mode procedures for femtocells*, *Bell Labs Technical Journal*, Vol. 15, No. 2, pp. 95-116.
- [b-Cui] Cui, S., Goldsmith, A.J., and Bahai, A. (2004), *Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks*, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 22, No. 6, pp. 1089-1098.
- [b-ESTAR1] ENERGY STAR (2008), *computer specification Version 5.0*.
<http://www.energystar.gov/ia/partners/prod_development/revisions/downloads/computer/Version5.0_Computer_Spec.pdf?ef97-3c22>
- [b-Fettweis] Fettweis, G. and Zimmermann, E. (2008), *ICT energy consumption – trends and challenge*, *International symposium on wireless personal multimedia communications (WPMC)*, pp. 2006-2009.

- [b-Fili] Senza Fili Consulting (2010), *Compact base stations: a new step in the evolution of base station design*.
<http://www.senza-fili.com/downloads/SenzaFili_CompactBTS.pdf>
- [b-GeSI] GeSI (2008), *Smart 2020 report*, Global e-Sustainability Initiative (GeSI).
- [b-Grant] Grant, P. (2010), *Green Radio Techniques for Improved Wireless Basestation Design*, IEEE.
- [b-Huang] Huang, H., Pillai, P., and Shin, K.G. (2003), *Design and implementation of power-aware virtual memory*, usenix.org.
- [b-INST] In-Stat, *Small Cell Base Stations Vital to 4G Deployments*.
<<http://www.instat.com/newmk.asp?ID=2810&SourceID=00000652000000000000>>
- [b-Kim] Kim, Y., et al. (2010), *Analysis of energy consumption in packet burst switching networks*, 9th International Conference on Optical Internet (COIN), July, pp. 1-3.
- [b-Klein] Klein, T. *Next-Generation Energy Efficient Networks: Overview of the GreenTouch Consortium*, GreenTouch Consortium
<<http://www.greentouch.org/index.php?page=member-projects>>
- [b-Li] Li, G.Y. et al. (2011), *Energy-efficient wireless communications: tutorial, survey, and open issues*, Wireless Communications, IEEE, Vol. 18, No. 6, pp. 28-35.
- [b-Nagajothy] Nagajothy, M. and Radha, S. (2009), *Network lifetime enhancement in wireless sensor network using network coding*, International Conference on Control, Automation, Communication and Energy Conservation, INCACEC, June, pp. 1-4.
- [b-NICC ND1424] NICC ND 1424 (2008), *Guidelines on DSL power saving models and non-stationary noise in metallic access networks*.
- [b-Peng] Peng, S. et al. (2010), *Burst switching for energy efficiency in optical networks*, 2010 Conference on (OFC/NFOEC) Optical Fiber Communication (OFC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference, March, pp. 1-3.
- [b-SCELL] Octasic, *Small cell basestations*.
<http://www.octasic.com/en/applications/wireless/small_cell.php>
- [b-Zhisheng] Zhisheng, N. et al. (2010), *Cell zooming for cost-efficient green cellular networks*, *Communications Magazine, IEEE*, Vol. 48, No. 11, pp. 74-79.

SÉRIES DES RECOMMANDATIONS UIT-T

Série A	Organisation du travail de l'UIT-T
Série D	Principes généraux de tarification
Série E	Exploitation générale du réseau, service téléphonique, exploitation des services et facteurs humains
Série F	Services de télécommunication non téléphoniques
Série G	Systèmes et supports de transmission, systèmes et réseaux numériques
Série H	Systèmes audiovisuels et multimédias
Série I	Réseau numérique à intégration de services
Série J	Réseaux câblés et transmission des signaux radiophoniques, télévisuels et autres signaux multimédias
Série K	Protection contre les perturbations
Série L	Construction, installation et protection des câbles et autres éléments des installations extérieures
Série M	Gestion des télécommunications y compris le RGT et maintenance des réseaux
Série N	Maintenance: circuits internationaux de transmission radiophonique et télévisuelle
Série O	Spécifications des appareils de mesure
Série P	Terminaux et méthodes d'évaluation subjectives et objectives
Série Q	Commutation et signalisation
Série R	Transmission télégraphique
Série S	Equipements terminaux de télégraphie
Série T	Terminaux des services télématiques
Série U	Commutation télégraphique
Série V	Communications de données sur le réseau téléphonique
Série X	Réseaux de données, communication entre systèmes ouverts et sécurité
Série Y	Infrastructure mondiale de l'information, protocole Internet et réseaux de prochaine génération
Série Z	Langages et aspects généraux logiciels des systèmes de télécommunication