

UNIVERSITE DE YAOUNDE

\*\*\*\*\*

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE  
POLYTECHNIQUE DE YAOUNDE

\*\*\*\*\*

DEPARTEMENT DE  
MATHEMATIQUES ET SCIENCES



UNIVERSITY OF YAOUNDE

\*\*\*\*\*

NATIONAL ADVANCED  
SCHOOL OF ENGINEERING

\*\*\*\*\*

DEPARTMENT OF  
MATHEMATICS AND PHYSICAL

# EXPOSE DE RESEAU MOBILE

## GESTION DE LA LOCALISATION

**Présenté par :**

- |                      |         |
|----------------------|---------|
| 1. DONFACK Pascal    | (M1-GI) |
| 2. TIWA Tiotsap      | (M1-GI) |
| 3. FEKE Jimmy Wilson | (M1-GI) |
| 4. TEMGOUA FOBANKE   | (M1-GI) |

**Examineur :**

**Pr. Djotio**

Année académique 2024-2025

## Résumé

La gestion de la localisation dans les réseaux mobiles est un mécanisme fondamental permettant au réseau de savoir où se trouve approximativement un terminal utilisateur (UE) pour lui acheminer les communications, tout en optimisant drastiquement la consommation d'énergie du terminal et la charge de signalisation sur le réseau. Plutôt que de suivre le terminal à chaque changement de **cellule** (zone couverte par une **station de base** - **BTS, NodeB, eNodeB, gNodeB**), le réseau regroupe les cellules en zones plus larges : les **Zones de Localisation (LA)** en 2G/3G et les **Zones de Suivi (Tracking Areas - TA)** en 4G/5G. Un terminal en mode veille n'effectue une **mise à jour de localisation** (Location Update, TAU, Registration Update) que lorsqu'il entre dans une nouvelle LA/TA (ou une TA non incluse dans sa **TA List** en 4G/5G). La gestion de cette localisation au niveau des zones est assurée par des entités du **cœur de réseau** comme le **MME** (4G) ou l'**AMF** (5G), qui enregistrent la dernière zone connue de l'UE en consultant et mettant à jour les informations stockées dans les bases de données centrales (**HSS/UDM**). Lorsqu'une communication entrante arrive, le MME/AMF initie une procédure de **Paging**, demandant à toutes les stations de base de la dernière LA/TA enregistrée de diffuser un message d'appel pour retrouver le terminal. Ce système représente un compromis essentiel : il réduit la fréquence des mises à jour mais augmente la portée (et donc la charge) du Paging.

**Mots-clés : cellule, BTS, NodeB, MME, Paging, Localisation.**

# Table des matières :

Résumé .....	2
Glossaire .....	6
Introduction .....	10
Contexte : L'Ère de la Mobilité et de la Connectivité Intelligente .....	10
Le Défi Central : Joignabilité vs Efficacité .....	10
Problématique Centrale .....	10
1 Le Principe Fondamental : Localiser pour Connecter dans un Monde Mobile .....	13
1.1 La Nécessité de la Localisation : Assurer la Joignabilité .....	14
1.2 Le Concept Cellulaire : La Base Géographique .....	14
1.3 Localisation Réseau vs Géolocalisation (GPS) .....	14
1.4 Le Dilemme Fondamental : Joignabilité vs Ressources (Introduction) .....	15
2 Les Architectes de la Couverture Radio : Rôle des Stations de Base .....	15
2.1 Fonction Générale : Le Pont entre l'Utilisateur et le Réseau .....	15
2.2 L'Évolution des Stations de Base et leur Impact sur la Localisation .....	16
3 Les Gardiens de la Mobilité : Rôle des Entités du Cœur de Réseau .....	17
3.1 Centralisation de la Gestion : Pourquoi un Cœur de Réseau ? .....	17
3.2 Les Entités Historiques (2G/3G) : MSC/VLR et SGSN (Contexte) .....	17
3.3 Les Acteurs Clés des Réseaux Paquets Modernes (4G/5G) .....	18
3.4 Les Bases de Données Stratégiques : Savoir Où Chercher .....	18
3.5 Synthèse : Le Cœur de Réseau comme Référentiel de Localisation Agrégée .....	19
4 La Structuration Hiérarchique de la Localisation : Cellules et Zones .....	19
4.1 Les Zones de Suivi (TA - Tracking Areas) : Le Standard Moderne (4G/5G) .....	20
4.2 Le Concept de TA List : Une Flexibilité Accrue (Introduction) .....	20
5 La Tracking Area (TA) : L'Unité de Gestion de Localisation en 4G/5G .....	22
5.1 Rôle Opérationnel : La Zone de "Libre Circulation" en Mode Veille .....	23
5.2 Identification: Le Tracking Area Identity (TAI) .....	23
6 La Mise à Jour de Zone de Suivi (Tracking Area Update - TAU / Registration Update) .....	23
6.1 Objectif : Informer le Réseau du Changement de Zone .....	23
6.2 Déclencheurs de la Procédure (Triggers) .....	23
6.3 Déroulement Typique de la Procédure (Exemple simplifié 4G TAU) .....	25
6.4 Le Rôle Crucial de la TA List .....	26
7 La Procédure de Recherche (Paging) .....	27

## Exposé de réseaux mobiles : Gestion de la localisation

7.1	Objectif : Retrouver et "Réveiller" un Terminal en Veille .....	27
7.2	Déclencheurs de la Procédure (Triggers) .....	27
7.3	Déroulement Typique de la Procédure (Exemple simplifié 4G) .....	27
7.4	L'Impact de la TA List sur le Paging .....	28
8	Interrelation et Impact sur la Signalisation : Le Compromis Dynamique .....	28
9	Configuration Optimale des TAs .....	30
9.1	Le Compromis Taille vs Paging: .....	30
9.2	Choix de la Planification: .....	31
10	Algorithmes d'Optimisation Basés sur l'IA et le Machine Learning (ML) .....	38
10.1	Cas d'Usage Spécifiques : .....	38
10.2	Intégration dans l'Architecture Réseau : .....	39
10.3	Défis de l'IA/ML : .....	39
11	Comparaison : Gestion en 4G (LTE) vs 5G (NR) .....	39
11.1	Architecture Réseau .....	40
11.2	Terminologie et Fonctions de Gestion de la Mobilité .....	41
11.3	Comparaison : TAU (4G) vs RAU et RNAU (5G) .....	41
12	Stratégies Complémentaires et Considérations .....	41
12.1	Coordination Inter-RAT / Inter-Système .....	41
12.2	Impact sur la Batterie .....	41
	Synthèse des Mécanismes Fondamentaux .....	43
	Réponse à la Problématique Centrale .....	44
	L'Importance Cruciale d'une Gestion de Localisation Efficace .....	45
	Conclusion Générale .....	45
	Références .....	46

# TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Structure simplifiée d'un réseau cellulaire mobile .....	13
Figure 2 : Tracking area .....	22
Figure 3 : Illustration : changement de tracking area $\frac{1}{2}$ .....	24
Figure 4 illustration : changement de tracking area $\frac{2}{2}$ .....	25
Figure 5 : structure TAL d'un zoom .....	31
Figure 6 : Données Clés et Métriques .....	35
Figure 7: Tableau d'Optimisation Multi-Critères .....	37
Figure 8 : Architecture 4G - LTE .....	40
Figure 9 : Structure 5G NR .....	40
Figure 10 : Terminologie et Fonctions de Gestion de la Mobilité .....	41
Figure 11 : Comparaison : TAU (4G) vs RAU et RNAU (5G) .....	41

## Glossaire

### A :

- **AMF (Access and Mobility Management Function) :** Fonction clé du cœur de réseau 5G (5GC), responsable de la gestion de l'enregistrement, de la connexion, de la joignabilité (suivi des TA) et de la mobilité des terminaux. Équivalent du MME en 4G, mais dans une architecture basée sur les services (SBA). Initie le Paging en 5G.
- **Antenne Relais / Station de Base :** Équipement physique du réseau d'accès radio (BTS, NodeB, eNodeB, gNodeB) qui crée une cellule de couverture radio et assure l'interface entre les terminaux mobiles et le reste du réseau. Diffuse les identifiants de cellule et de zone (LA/TA).
- **Architecture Plate :** Caractéristique des réseaux d'accès 4G (E-UTRAN) et 5G (NG-RAN) où les stations de base (eNodeB/gNodeB) intègrent des fonctions de contrôle radio auparavant situées dans des contrôleurs centraux (BSC/RNC), réduisant la latence et simplifiant le réseau.

### B :

- **BTS (Base Transceiver Station) :** Station de base utilisée dans les réseaux 2G (GSM). Gère la transmission et la réception radio dans une cellule et est connectée à un BSC. Diffuse les identifiants CGI et LAI.

### C :

- **Cellule (Cell) :** Unité géographique de base de la couverture radio, desservie par une station de base. Chaque cellule possède un identifiant unique (CGI, ECGI, NCGI) et appartient à une zone de localisation (LA) ou de suivi (TA) plus large.
- **Cœur de Réseau (Core Network - CN) :** Partie centrale de l'infrastructure d'un réseau mobile, responsable de fonctions clés comme la gestion de la mobilité (MME/AMF), la gestion des sessions, l'authentification (HSS/UDM), et l'interconnexion avec d'autres réseaux. Exemples : EPC (4G), 5GC (5G).
- **Compromis (Mise à Jour vs Paging) :** Principe fondamental de la gestion de la localisation : regrouper les cellules en zones (LA/TA) réduit la fréquence des mises à jour de localisation (économie d'énergie et de signalisation) mais augmente la charge de Paging (recherche sur une zone plus large).
- **Consommation d'Énergie :** Un des facteurs critiques optimisés par la gestion de la localisation. En réduisant les mises à jour lorsque le terminal est en mode veille, on prolonge la durée de vie de sa batterie.

### E :

- **eNodeB (Evolved NodeB) :** Station de base utilisée dans les réseaux 4G (LTE). Plus intelligente que les BTS/NodeB, elle intègre des fonctions de contrôle radio et communique directement avec le cœur de réseau EPC (MME, S-GW). Diffuse les identifiants ECGI et TAI.

## Exposé de réseaux mobiles : Gestion de la localisation

- **EPC (Evolved Packet Core) :** Architecture du cœur de réseau pour la 4G (LTE), entièrement basée sur IP. Inclut des entités clés comme le MME, le S-GW, le P-GW et le HSS.
- **État du Terminal :** Indique si un terminal est activement en communication (Mode Connecté : ECM-CONNECTED en 4G, CM-CONNECTED en 5G) ou en veille mais enregistré sur le réseau (Mode Veille : ECM-IDLE en 4G, CM-IDLE en 5G). La gestion de la localisation par LA/TA concerne principalement le mode veille.

### G :

- **gNodeB (Next Generation NodeB) :** Station de base utilisée dans les réseaux 5G (NR). Conçue pour des performances très élevées (débit, latence, densité) et une grande flexibilité (beamforming, Massive MIMO, architecture CU/DU). Communique avec le cœur de réseau 5GC (AMF, UPF). Diffuse les identifiants NCGI et TAI.
- **Gestion de la Localisation :** Ensemble des mécanismes et procédures permettant à un réseau mobile de suivre la position approximative (au niveau LA/TA) d'un terminal en mode veille pour pouvoir le contacter (Paging), tout en minimisant la consommation d'énergie et la signalisation.

### H :

- **Handover / Transfert Intercellulaire :** Processus par lequel un terminal en communication active (mode connecté) passe d'une cellule à une autre sans interruption de service. Géré par le RAN (et parfois le CN).
- **HSS (Home Subscriber Server) :** Base de données centrale dans les réseaux 4G/EPC (et IMS), stockant les informations d'abonnement, les clés de sécurité et l'adresse du MME servant actuellement l'abonné. Point d'ancrage pour localiser l'abonné au niveau du cœur de réseau.

### I :

- **Identifiant de Cellule (Cell Identity) :** Identifiant unique attribué à chaque cellule. Exemples : CGI (Cell Global Identifier en 2G/3G), ECGI (E-UTRAN CGI en 4G), NCGI (NR CGI en 5G). Contient généralement MCC, MNC et un identifiant de cellule local.
- **Identifiant de Zone :** Identifiant unique attribué à une zone de localisation ou de suivi. Exemples : LAI (Location Area Identity en 2G/3G, contenant MCC, MNC, LAC) et TAI (Tracking Area Identity en 4G/5G, contenant MCC, MNC, TAC). Diffusé par les stations de base.

### L :

- **LA (Location Area / Zone de Localisation) :** Groupe de cellules contiguës utilisé en 2G/3G (domaine circuit) pour la gestion de la localisation en mode veille. Un terminal effectue une mise à jour de localisation (LU) uniquement en entrant dans une nouvelle LA.

## Exposé de réseaux mobiles : Gestion de la localisation

- **LTE (Long Term Evolution)** : Technologie standard pour les réseaux mobiles de 4ème génération (4G), offrant des débits de données élevés et une architecture tout-IP (EPC).

### M :

- **Mise à Jour de Localisation/Zone de Suivi** : Procédure initiée par un terminal en mode veille lorsqu'il détecte un changement de zone (LA ou TA/TA List non enregistrée). Il informe le cœur de réseau (MSC/VLR, SGSN, MME, AMF) de sa nouvelle localisation approximative. Exemples : Location Update (LU), Tracking Area Update (TAU), Registration Update (5G).
- **MME (Mobility Management Entity)** : Entité de contrôle clé dans le cœur de réseau 4G (EPC), responsable de la gestion de la mobilité des terminaux en mode veille (suivi des TA), de la gestion des sessions et de l'authentification. Initie le Paging en 4G.
- **Mode Veille (Idle Mode)** : État dans lequel un terminal est allumé et enregistré sur le réseau mais n'a pas de connexion de données ou d'appel active. Il écoute périodiquement le Paging et effectue des mises à jour de localisation si nécessaire (basées sur LA/TA). Exemples : ECM-IDLE (4G), CM-IDLE (5G).

### N :

- **NodeB** : Station de base utilisée dans les réseaux 3G (UMTS/WCDMA). Connectée à un RNC qui gère le contrôle radio. Diffuse les identifiants CGI, LAI et RAI.
- **NR (New Radio)** : Interface radio et technologie standard pour les réseaux mobiles de 5ème génération (5G), conçue pour divers cas d'usage (eMBB, URLLC, mMTC).

### P :

- **Paging (Recherche de Terminal)** : Procédure initiée par le cœur de réseau (MSC/VLR, SGSN, MME, AMF) pour localiser un terminal en mode veille lorsqu'une communication entrante arrive. Des messages de Paging sont diffusés dans toutes les cellules de la dernière LA ou TA (ou TA List) enregistrée pour ce terminal.

### R :

- **RAN (Radio Access Network / Réseau d'Accès Radio)** : Partie du réseau mobile qui gère la connexion radio avec les terminaux. Comprend les stations de base et, dans les anciennes générations, les contrôleurs (BSC/RNC). Exemples : BSS (2G), UTRAN (3G), E-UTRAN (4G), NG-RAN (5G).
- **Resélection de Cellule (Cell Reselection)** : Processus par lequel un terminal en mode veille choisit une nouvelle cellule sur laquelle camper lorsque le signal de la cellule actuelle devient trop faible ou qu'une meilleure cellule est disponible. Ce changement peut déclencher une mise à jour de localisation s'il implique un changement de LA/TA.

### S :

- **Signalisation** : Messages de contrôle échangés entre le terminal et le réseau (ou entre les entités du réseau) pour gérer la connexion, la mobilité, la sécurité, etc. La gestion



## Exposé de réseaux mobiles : Gestion de la localisation

de la localisation vise à réduire la signalisation liée aux mises à jour. Distincte du trafic de données utilisateur.

**T :**

- **TA (Tracking Area / Zone de Suivi) :** Groupe de cellules contiguës utilisé en 4G et 5G pour la gestion de la localisation en mode veille. Un terminal effectue une mise à jour (TAU / Registration Update) lorsqu'il entre dans une TA dont l'identifiant (TAI) n'est pas dans sa TA List.
- **TA List (Liste de Zones de Suivi) :** Optimisation introduite en 4G/5G où le réseau peut assigner au terminal une liste de plusieurs TAI adjacents. Le terminal n'effectue une mise à jour que s'il sort de la zone couverte par l'ensemble de cette liste, réduisant encore la fréquence des mises à jour.
- **Terminal (User Equipment - UE) :** Tout appareil utilisé par un utilisateur final pour accéder aux services du réseau mobile (smartphone, tablette, objet connecté).

**U :**

- **UDM (Unified Data Management) :** Fonction du cœur de réseau 5G (5GC), évolution du HSS. Gère les données d'abonnement unifiées, l'authentification et stocke l'adresse de l'AMF servant l'abonné.

**5 :**

- **5GC (5G Core Network) :** Architecture du cœur de réseau pour la 5G (NR). Basée sur les services (SBA), virtualisée et conçue pour la flexibilité (network slicing). Inclut des fonctions clés comme l'AMF, SMF, UPF, UDM, AUSF.

## Introduction

### Contexte : L'Ère de la Mobilité et de la Connectivité Intelligente

Nous vivons une époque définie par une connectivité sans précédent, où les réseaux mobiles sont devenus l'épine dorsale invisible de nos sociétés numériques. Des communications interpersonnelles instantanées à l'accès omniprésent à l'information, en passant par l'émergence de l'Internet des Objets (IoT) et les promesses des villes intelligentes, la capacité à rester connecté en tout lieu et à tout moment est désormais une attente fondamentale. Cette connectivité permanente repose sur des infrastructures de réseaux mobiles de plus en plus sophistiquées, évoluant rapidement de la 2G à la 5G et au-delà, pour répondre à une demande exponentielle en termes de débit, de latence, de fiabilité et de densité d'appareils connectés. Au cœur de cette prouesse technologique se trouve un défi intrinsèque et permanent : la **mobilité** des utilisateurs et de leurs terminaux (User Equipment - UE). Contrairement aux réseaux filaires, les utilisateurs des réseaux mobiles se déplacent constamment, traversant les frontières invisibles des zones de couverture radio, appelées cellules. Pour maintenir une connexion transparente et assurer la livraison ininterrompue des services, le réseau doit impérativement posséder une connaissance, même approximative, de la **localisation** de chaque terminal actif sur son infrastructure.

### Le Défi Central : Joignabilité vs Efficacité

Assurer cette connaissance pose un dilemme fondamental. D'une part, une localisation précise et mise à jour en temps réel semblerait idéale pour garantir qu'un appel, un message ou un paquet de données atteigne instantanément le destinataire. D'autre part, un tel suivi constant imposerait une charge insoutenable tant sur le terminal que sur le réseau lui-même. Le terminal mobile verrait sa **batterie** se vider à une vitesse alarmante en raison des transmissions radio fréquentes nécessaires pour signaler sa position. Simultanément, le réseau serait submergé par un volume colossal de **messages de signalisation** liés à ces mises à jour de localisation, gaspillant de précieuses ressources radio et de traitement au détriment du trafic utile des utilisateurs. La fonction de **gestion de la localisation** dans les réseaux mobiles est précisément conçue pour naviguer dans ce dilemme complexe. Son objectif n'est pas le géopositionnement de haute précision, mais plutôt de maintenir un équilibre délicat : savoir *suffisamment* où se trouve un terminal pour pouvoir le joindre rapidement (le rendre "pageable") tout en minimisant l'impact sur l'autonomie du terminal et la charge globale du réseau. Cette quête d'équilibre est devenue encore plus cruciale avec l'avènement de la 4G (LTE) et de la 5G (NR), qui ont introduit des architectures optimisées et le concept central de **Zone de Suivi (Tracking Area - TA)** pour affiner cette gestion.

### Problématique Centrale

Face à ces enjeux croisés de performance, d'efficacité énergétique et de gestion des ressources réseau, la question fondamentale à laquelle ce rapport s'efforcera de répondre est la suivante :

**Comment les réseaux mobiles modernes, en particulier les systèmes 4G et 5G, implémentent-ils et optimisent-ils la gestion de la localisation des terminaux utilisateurs via le concept fondamental des Zones de Suivi (Tracking Areas), afin d'assurer une**

### joignabilité fiable tout en minimisant la consommation énergétique et la charge de signalisation sur l'infrastructure ?

Pour répondre de manière exhaustive à cette problématique et fournir une compréhension approfondie de la gestion de la localisation, ce rapport adoptera une structure progressive et détaillée, explorant les différents mécanismes, concepts et défis associés. Notre investigation sera organisée comme suit :

- ❖ **Partie I : Fondements de la Gestion de la Localisation dans les Réseaux Mobiles.** Cette première partie posera les bases en expliquant le principe général de la localisation dans un environnement cellulaire. Nous y décrirons le rôle primordial des antennes relais (des BTS aux gNodeB) comme points d'ancrage physiques et radio, ainsi que les fonctions essentielles des entités du cœur de réseau (MME, AMF, HSS, UDM) qui orchestrent la mobilité à plus grande échelle. Nous introduirons également la hiérarchie fondamentale des zones : cellules, Location Areas (LA) historiques, et la transition vers les Tracking Areas (TA) modernes.
- ❖ **Partie II : Mécanismes Clés de la Gestion de la Localisation via les Tracking Areas.** Se concentrant sur le concept névralgique des TA en 4G et 5G, cette section détaillera en profondeur la définition et la configuration d'une Tracking Area. Elle analysera ensuite les deux procédures fondamentales qui régissent la localisation en mode veille : la mise à jour de zone de suivi (**Tracking Area Update - TAU** et ses équivalents 5G) déclenchée par la mobilité de l'utilisateur, et la procédure de recherche (**Paging**) initiée par le réseau pour contacter un terminal. L'impact direct de la taille et de la configuration des TA sur la fréquence des TAU et l'étendue du Paging, et donc sur la charge de signalisation, sera minutieusement examiné.
- ❖ **Partie III : Défis, Optimisation et Évolution de la Gestion des Tracking Areas.** Ayant établi les mécanismes de base, cette partie abordera les défis inhérents à la gestion des TA, notamment le risque de signalisation excessive ou de délai de Paging. Nous explorerons ensuite en détail diverses **stratégies d'optimisation** employées par les opérateurs : la configuration statique optimale des frontières et de la taille des TA, l'utilisation avancée des **TA Lists**, les approches de **regroupement dynamique** des TA basées sur les schémas de mobilité observés, et l'application potentielle d'algorithmes d'**Intelligence Artificielle et de Machine Learning** pour une gestion prédictive et adaptative. Une **comparaison** éclairante entre les approches et les capacités de gestion de la localisation en **4G et en 5G** mettra en lumière les évolutions et les nouvelles possibilités offertes par la dernière génération de réseaux.
- ❖ **Partie IV : Synthèse et Conclusion.** Enfin, nous conclurons ce rapport par une synthèse des points clés abordés, réitérant la réponse à la problématique centrale. Nous soulignerons l'importance cruciale d'une gestion de la localisation efficace et optimisée pour la performance globale des réseaux mobiles actuels et futurs, et nous pourrions évoquer quelques perspectives d'évolution de ces mécanismes face aux nouveaux défis technologiques.

Ce plan détaillé vise à couvrir tous les aspects essentiels de la gestion de la localisation via les Tracking Areas, en fournissant un niveau d'explication généreux et approfondi, conformément

## **Exposé de réseaux mobiles : Gestion de la localisation**

aux attentes d'un rapport exhaustif sur ce sujet complexe et central des réseaux mobiles intelligents.

# Partie I : Fondements de la Gestion de la Localisation dans les Réseaux Mobiles

Cette première partie a pour vocation d'établir les fondations conceptuelles et architecturales sur lesquelles repose l'ensemble de la gestion de la localisation dans les réseaux mobiles. Avant de pouvoir analyser les mécanismes dynamiques tels que les mises à jour de zone de suivi (TAU) ou les procédures de recherche (Paging), et avant d'explorer les stratégies d'optimisation, il est indispensable de comprendre les principes fondamentaux qui régissent la manière dont un réseau "sait" où se trouve un terminal, les composants physiques et logiques impliqués, et la structure géographique utilisée pour organiser cette information. Nous aborderons donc ici le concept cellulaire de base, le rôle crucial des différentes générations de stations de base, les fonctions des entités du cœur de réseau dédiées à la mobilité, et enfin, la hiérarchie des zones (cellules, LA, TA) qui constitue la pierre angulaire de la gestion de la localisation efficace.

## 1 Le Principe Fondamental : Localiser pour Connecter dans un Monde Mobile

Au cœur de l'expérience utilisateur des réseaux mobiles réside une attente simple mais techniquement complexe : pouvoir initier ou recevoir une communication (appel vocal, SMS, session de données) à tout moment et en tout lieu couvert par le réseau. Pour que cette attente soit satisfaite, le réseau doit être capable de localiser le terminal destinataire afin de lui acheminer l'information.

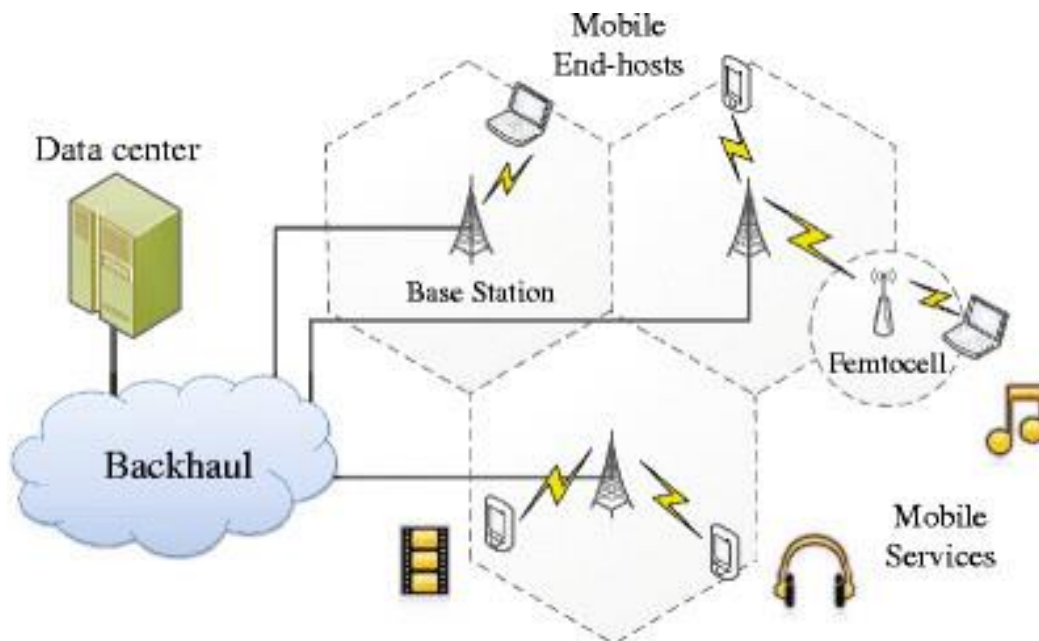


Figure 1 : Structure simplifiée d'un réseau cellulaire mobile

### 1.1 La Nécessité de la Localisation : Assurer la Joignabilité

La fonction première de la gestion de la localisation, du point de vue du réseau, est d'assurer la **joignabilité** (reachability) des terminaux. Lorsqu'un terminal n'est pas activement engagé dans une communication (état souvent appelé **mode veille** ou "Idle mode"), il n'est pas nécessaire pour le réseau de connaître sa position avec une précision extrême. Cependant, le réseau doit savoir dans quelle zone géographique *générale* il se trouve. Si un appel entrant ou un paquet de données est destiné à ce terminal, le réseau doit pouvoir le "réveiller" et établir une connexion. Sans une information de localisation, même approximative, le réseau serait contraint de rechercher le terminal sur l'ensemble de sa vaste zone de couverture, une opération impraticable et extrêmement inefficace. La gestion de la localisation fournit donc au réseau l'information minimale nécessaire pour initier efficacement le contact avec un terminal en mode veille.

### 1.2 Le Concept Cellulaire : La Base Géographique

Le fondement même des réseaux mobiles repose sur le **concept cellulaire**. Plutôt que d'utiliser un unique émetteur de grande puissance pour couvrir une large zone, le territoire est divisé en de nombreuses zones géographiques plus petites, appelées **cellules**. Chaque cellule est desservie par une **station de base** (ou antenne relais) de puissance plus faible. Cette approche présente plusieurs avantages majeurs :

- **Réutilisation des fréquences** : Les mêmes fréquences radio peuvent être réutilisées dans des cellules suffisamment éloignées les unes des autres, augmentant considérablement la capacité globale du réseau.
- **Adaptation de la couverture** : La taille et la forme des cellules peuvent être adaptées aux besoins spécifiques de la zone (densité de population, topographie, type d'environnement - urbain, rural). Les cellules urbaines sont généralement petites (parfois quelques centaines de mètres) pour offrir une grande capacité, tandis que les cellules rurales peuvent s'étendre sur plusieurs kilomètres.
- **Moindre puissance d'émission** : Les terminaux et les stations de base peuvent fonctionner avec une puissance d'émission plus faible, ce qui est bénéfique pour la santé, l'autonomie des batteries et la réduction des interférences. Cette structure cellulaire est la grille géographique sur laquelle la gestion de la localisation s'appuie. Savoir dans quelle cellule se trouve un terminal est la forme de localisation la plus granulaire possible au niveau du réseau radio.

### 1.3 Localisation Réseau vs Géolocalisation (GPS)

Il est crucial de distinguer la gestion de la localisation opérée par le réseau mobile de la géolocalisation de haute précision fournie par des systèmes comme le GPS (Global Positioning System), Galileo, ou GLONASS. Ces derniers permettent au terminal lui-même de calculer ses coordonnées géographiques exactes (latitude, longitude) en se basant sur les signaux reçus de satellites dédiés. Cette information peut ensuite être utilisée par des applications *sur* le terminal (navigation, services basés sur la localisation). La localisation gérée par le réseau mobile, elle, a un objectif différent et une granularité

bien moindre. Son but est de déterminer la **zone de service** (cellule ou groupe de cellules) dans laquelle le terminal se trouve, principalement pour des raisons de routage des communications et de gestion de la mobilité au sein du réseau de l'opérateur. Bien que des techniques de localisation réseau plus précises existent (basées sur les temps d'arrivée des signaux, les angles, etc., souvent pour les services d'urgence ou commerciaux), la gestion de la localisation fondamentale pour la joignabilité en mode veille se base sur l'identification de la cellule ou de la zone (LA/TA) de rattachement.

### 1.4 Le Dilemme Fondamental : Joignabilité vs Ressources (Introduction)

Comme évoqué dans l'introduction générale, la gestion de la localisation est intrinsèquement liée à un compromis. Un suivi au niveau de la cellule, bien que précis, impliquerait que le terminal informe le réseau à chaque passage d'une cellule à une autre. Dans un environnement urbain dense ou pour un utilisateur en véhicule, ces changements peuvent être très fréquents (parfois toutes les quelques secondes ou minutes). Chaque mise à jour consomme de l'énergie sur le terminal et génère du trafic de signalisation sur le réseau radio et dans le cœur de réseau. Multiplié par des millions d'utilisateurs, cela deviendrait ingérable. Inversement, si le réseau ne met à jour la localisation que très rarement, il risque de devoir chercher le terminal sur une zone très étendue lorsqu'il doit le contacter, ce qui augmente le délai de connexion et la charge de la procédure de recherche (**Paging**). La conception des mécanismes de localisation vise donc à trouver le "juste milieu", un équilibre qui sera exploré plus en détail à travers l'introduction des **zones LA** et **TA**.

## 2 Les Architectes de la Couverture Radio : Rôle des Stations de Base

Les éléments les plus visibles et les plus fondamentaux de l'infrastructure radio sont les stations de base, aussi appelées antennes relais. Elles constituent le point d'accès physique et radio pour les terminaux et jouent un rôle absolument critique dans la définition et la communication des informations de localisation de base.

### 2.1 Fonction Générale : Le Pont entre l'Utilisateur et le Réseau

Indépendamment de la génération technologique, la fonction première d'une station de base est d'établir et de maintenir la liaison radio avec les terminaux présents dans sa cellule de couverture. Elle gère la transmission et la réception des signaux radiofréquences, applique les techniques de codage, de modulation et de gestion des ressources radio spécifiques à sa technologie (GSM, UMTS, LTE, NR), et sert de pont vers le reste de l'infrastructure réseau (le cœur de réseau). Pour la gestion de la localisation, son rôle essentiel est de **diffuser en permanence des informations d'identification** dans ses messages système (broadcast channels). Ces informations permettent à un terminal d'identifier la cellule sur laquelle il se trouve et la zone de localisation plus large à laquelle cette cellule appartient.



## 2.2 L'Évolution des Stations de Base et leur Impact sur la Localisation

La terminologie et les capacités des stations de base ont évolué significativement avec chaque génération de réseau mobile, reflétant les progrès technologiques et les changements architecturaux.

### 2.2.1 BTS (Base Transceiver Station) en 2G (GSM) : Les Fondations

La BTS est l'unité de base du réseau d'accès radio 2G (BSS - Base Station Subsystem). Relativement simple, elle se concentre sur la couche physique radio (émission/réception). Pour la localisation, elle diffuse deux informations cruciales :

- **CGI (Cell Global Identity)** : L'identifiant unique de la cellule qu'elle dessert.
- **LAI (Location Area Identity)** : L'identifiant de la Zone de Localisation (LA) à laquelle la cellule appartient.  
La BTS est contrôlée par un **BSC (Base Station Controller)**, qui gère les ressources radio et la mobilité (handovers) pour plusieurs BTS. L'intelligence est donc centralisée au niveau du BSC.

### 2.2.2 NodeB (3G/UMTS) : Capacités Accrues

Le **NodeB** est l'équivalent 3G de la BTS, opérant avec la technologie WCDMA au sein du réseau d'accès UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network). Il possède des capacités radio plus avancées mais reste principalement focalisé sur la couche physique. Pour la localisation, il diffuse :

- **CGI** : L'identifiant de la cellule.
- **LAI** : L'identifiant de la Zone de Localisation (pour les services voix/SMS).
- **RAI (Routing Area Identity)** : L'identifiant de la Zone de Routage (RA), concept parallèle à la LA mais pour les services de données paquet (GPRS/UMTS).  
Comme la BTS, le NodeB est contrôlé par une entité supérieure, le **RNC (Radio Network Controller)**, qui centralise la gestion des ressources et de la mobilité pour plusieurs NodeBs.

### 2.2.3 gNodeB (Next Generation NodeB) en 5G (NR) : Flexibilité et Performances pour l'Avenir

Le **gNodeB** est la station de base 5G, conçue pour une flexibilité et des performances extrêmes (hauts débits, faible latence, connectivité massive) au sein du réseau d'accès NG-RAN. Son architecture peut être décomposée (CU/DU) et virtualisée. Pour la localisation, il poursuit le concept de la 4G :

- **NCGI (NR Cell Global Identifier)** : L'identifiant unique de la cellule 5G.
- **TAI (Tracking Area Identity)** : L'identifiant de la Zone de Suivi (TA). Le concept de TA est conservé en 5G, potentiellement avec une flexibilité de configuration accrue.



## Exposé de réseaux mobiles : Gestion de la localisation

Le gNodeB interagit avec le cœur de réseau 5G (5GC), principalement avec l'AMF pour la signalisation de mobilité, et supporte des scénarios de mobilité avancés comme la double connectivité (LTE+NR).

En dépit de leurs différences technologiques et architecturales, toutes les générations de stations de base partagent un rôle fondamental pour la gestion de la localisation : elles sont les **diffuseurs des identifiants géographiques de base**. C'est en écoutant les messages système émis par les stations de base environnantes qu'un terminal peut déterminer dans quelle cellule spécifique il se trouve (via CGI/ECGI/NCGI) et, plus important pour la gestion de la localisation en mode veille, à quelle zone de localisation plus large (LA ou TA, via LAI/TAI) cette cellule appartient. Cette information est le point de départ de toutes les procédures de mobilité gérées par le réseau.

### 3 Les Gardiens de la Mobilité : Rôle des Entités du Cœur de Réseau

Si les stations de base fournissent l'ancrage radio et les identifiants locaux, la gestion de la localisation à l'échelle du réseau et la mémorisation de la position des millions d'abonnés sont orchestrées par des entités logiques centralisées au sein du **cœur de réseau (Core Network - CN)**.

#### 3.1 Centralisation de la Gestion : Pourquoi un Cœur de Réseau ?

Il serait inefficace et complexe de gérer la localisation globale de chaque terminal uniquement au niveau des stations de base. Le cœur de réseau fournit une vue centralisée et cohérente. Il maintient une base de données de l'état et de la localisation approximative (LA/TA) de chaque terminal enregistré, gère les procédures d'authentification et d'autorisation, et coordonne la mobilité entre différentes zones et potentiellement différentes technologies d'accès radio.

#### 3.2 Les Entités Historiques (2G/3G) : MSC/VLR et SGSN (Contexte)

Pour bien comprendre l'évolution, il est utile de rappeler brièvement les entités 2G/3G :

- **MSC (Mobile Switching Center) / VLR (Visitor Location Register)** : Dans le domaine à commutation de circuits (voix/SMS), le MSC était le commutateur central. Le VLR, souvent co-localisé, était une base de données temporaire stockant les informations des abonnés présents dans sa zone de service, y compris leur **LAI (Location Area Identity)**. C'est le MSC/VLR qui gérait les Location Updates (LU) et initiait le Paging basé sur la LA.
- **SGSN (Serving GPRS Support Node)** : Dans le domaine à commutation de paquets (données), le SGSN jouait un rôle similaire au MSC/VLR mais pour les **Routing Areas (RA)**, identifiées par un **RAI**. Il gérait les Routing Area Updates (RAU) et le Paging basé sur la RA.

### 3.3 Les Acteurs Clés des Réseaux Paquets Modernes (4G/5G)

Avec le passage à des réseaux tout-IP en 4G et 5G, de nouvelles entités ont pris le relais de la gestion de la mobilité et de la localisation.

#### 3.3.1 MME (Mobility Management Entity) en 4G/LTE : Le Chef d'Orchestre de la Mobilité EPC

Le MME est une entité de contrôle pure (il ne traite pas les données utilisateur) au sein du cœur de réseau 4G (EPC). Son rôle principal est la **gestion de la mobilité** des terminaux, en particulier en mode veille (ECM-IDLE). Ses fonctions liées à la localisation incluent :

- **Suivi des Tracking Areas (TA) :** Mémoriser la ou les dernières **TAI (Tracking Area Identities)** valides pour chaque terminal en mode veille (souvent sous forme d'une **TA List**).
- **Gestion des Procédures TAU :** Recevoir et traiter les requêtes de **Tracking Area Update (TAU)** envoyées par les terminaux lorsqu'ils changent de TA (non couverte par leur TA List).
- **Initiation du Paging :** Déclencher la procédure de Paging vers tous les eNodeBs de la ou des TA(s) enregistrée(s) pour un terminal lorsqu'une communication entrante arrive.
- **Gestion des États :** Maintenir l'état de mobilité du terminal (ECM-IDLE, ECM-CONNECTED).

#### 3.3.2 AMF (Access and Mobility Management Function) en 5G/NR : Gestion de l'Accès et de la Mobilité dans le 5GC

L'AMF est l'équivalent fonctionnel du MME dans le cœur de réseau 5G (5GC), qui adopte une architecture basée sur les services (SBA) plus modulaire et flexible. Il reprend les responsabilités de gestion de la mobilité et de la localisation :

- **Gestion de l'Enregistrement et de la Joignabilité :** Gérer les procédures d'enregistrement initial et les mises à jour (Registration Update, qui incluent les mises à jour de TA) et suivre la localisation au niveau de la **TA List** pour les terminaux en mode veille (CM-IDLE).
- **Gestion de la Mobilité :** Superviser les transitions d'état (CM-IDLE, CM-CONNECTED) et gérer les aspects de mobilité inter-gNodeB ou inter-RAT (Radio Access Technology).
- **Initiation du Paging :** Déclencher le Paging via les gNodeBs dans les TA appropriées.

### 3.4 Les Bases de Données Stratégiques : Savoir Où Chercher

Pour que les entités de gestion de la mobilité (MME/AMF) puissent fonctionner, elles doivent interagir avec des bases de données centrales qui stockent les informations permanentes des abonnés.

### 3.4.1 HLR (Home Location Register) / HSS (Home Subscriber Server) en 2G/3G/4G : Le Référentiel Central de l'Abonné

Le HLR (en 2G/3G) puis son évolution, le HSS (en 4G/IMS), est la base de données principale contenant le profil de chaque abonné (IMSI, services souscrits, clés de sécurité, etc.). Pour la localisation, son information cruciale est de stocker **l'adresse de l'entité de mobilité qui sert actuellement l'abonné** (adresse du MSC/VLR, du SGSN, ou du MME). Lorsqu'un terminal s'enregistre ou effectue une mise à jour de localisation impliquant un changement d'entité de service (par exemple, changement de MME), le HSS est informé et met à jour l'adresse enregistrée. C'est le HSS qui est interrogé par les entités externes pour savoir quel MME contacter afin de joindre un abonné.

### 3.4.2 UDM (Unified Data Management) en 5G : La Gestion Unifiée des Données

L'UDM est l'évolution du HSS dans l'architecture 5G. Il remplit des fonctions similaires de stockage des données d'abonnement (SUPI - équivalent IMSI, profils de service, données d'authentification) mais de manière décomposée et adaptée à une architecture basée sur les services et le cloud. Pour la localisation, il stocke **l'identité de l'AMF** qui dessert actuellement l'abonné, jouant ainsi le même rôle de point d'ancrage que le HSS.

## 3.5 Synthèse : Le Cœur de Réseau comme Référentiel de Localisation Agrégée

En résumé, le cœur de réseau, via ses entités de gestion de la mobilité (MME/AMF) et ses bases de données centrales (HSS/UDM), maintient une vue d'ensemble de la localisation approximative (au niveau LA/TA) de tous les terminaux enregistrés. Il ne suit pas les déplacements cellule par cellule en mode veille, mais il sait dans quelle zone plus large chaque terminal se trouve, lui permettant ainsi de gérer efficacement les mises à jour de localisation et d'initier le Paging de manière ciblée (mais sur une zone étendue).

## 4 La Structuration Hiérarchique de la Localisation : Cellules et Zones

Comme nous l'avons vu, suivre chaque terminal au niveau de la cellule en permanence est inefficace. La solution adoptée par tous les réseaux mobiles est d'introduire une structure hiérarchique de zones géographiques.

- ❖ **La Cellule : L'Unité de Base, Inefficace pour le Suivi en Veille**  
La **cellule**, définie par la couverture d'une station de base (ou d'un secteur d'antenne), reste l'unité fondamentale. Le réseau sait toujours dans quelle cellule se trouve un terminal *en communication active* (mode connecté), car c'est cette cellule qui lui fournit la connexion radio. Cependant, pour un terminal en **mode veille** (Idle), forcer une communication avec le réseau à chaque changement de cellule générerait une signalisation et une consommation d'énergie excessives.

## Exposé de réseaux mobiles : Gestion de la localisation

- ❖ **Le Regroupement Stratégique : Introduction des Zones de Localisation/Suivi**  
Pour pallier l'inefficacité du suivi au niveau cellulaire en mode veille, les réseaux regroupent plusieurs cellules géographiquement contiguës en **zones** plus larges. L'idée maîtresse est la suivante : tant qu'un terminal en mode veille se déplace à *l'intérieur* d'une même zone prédéfinie, il n'a **pas besoin d'informer le réseau** de ses changements de cellule. Il ne contacte le réseau pour une mise à jour de localisation que lorsqu'il **franchit la frontière** et entre dans une nouvelle zone.
- ❖ **Les Zones de Localisation (LA - Location Areas) : L'Approche Historique (2G/3G)**  
Le concept initial de regroupement, principalement pour le domaine voix/SMS (Circuit Switched), était la **Zone de Localisation (LA)**.
  - ❖ **Définition** : Une LA est un ensemble de cellules identifié par un **LAI (Location Area Identity)** unique (composé de MCC, MNC, et LAC - Location Area Code).
  - ❖ **Fonctionnement** : Un terminal en veille ne déclenche une procédure de **Location Update (LU)** vers le MSC/VLR que s'il campe sur une cellule dont le LAI diffusé est différent du LAI enregistré dans sa mémoire.
  - ❖ **Conséquence** : Réduit considérablement les mises à jour par rapport au suivi cellulaire, mais lorsque le réseau doit chercher le terminal (Paging), il doit envoyer le message de recherche à toutes les cellules de la LA. *(Note : Le concept parallèle de Routing Area - RA, avec son identifiant RAI et géré par le SGSN, existait pour le domaine paquet en 2G/3G).*

### 4.1 Les Zones de Suivi (TA - Tracking Areas) : Le Standard Moderne (4G/5G)

Avec l'avènement des réseaux tout-IP (4G/5G), le concept a été unifié et modernisé sous le nom de **Zone de Suivi (TA)**.

- ❖ **Définition** : Une TA est un ensemble de cellules (desservies par un ou plusieurs eNodeBs/gNodeBs) identifié par un **TAI (Tracking Area Identity)** unique (composé de MCC, MNC, et TAC - Tracking Area Code).
- ❖ **Fonctionnement** : Un terminal en mode veille (ECM-IDLE en 4G, CM-IDLE en 5G) déclenche une procédure de **Tracking Area Update (TAU)** en 4G, ou une **Registration Update** (qui inclut la mise à jour de TA) en 5G, vers le MME/AMF principalement lorsqu'il détecte qu'il est entré dans une cellule appartenant à une TA dont le TAI n'est pas considéré comme valide par le terminal (nous verrons le détail avec la TA List ci-dessous).
- ❖ **Conséquence** : Comme pour la LA, réduit drastiquement les mises à jour de localisation. Le Paging doit être effectué sur l'ensemble de la ou des TA(s) où le terminal est supposé se trouver.

### 4.2 Le Concept de TA List : Une Flexibilité Accrue (Introduction)

Une optimisation majeure introduite avec les TA est la possibilité pour le réseau (MME/AMF)

## Exposé de réseaux mobiles : Gestion de la localisation

d'assigner au terminal non pas une seule TAI, mais une **liste de plusieurs TAI** (TA List) correspondant généralement à des zones adjacentes.

- ❖ **Fonctionnement** : Le terminal ne déclenchera une TAU que s'il entre dans une cellule dont le TAI n'appartient **à aucune des entrées de sa TA List** enregistrée.
- ❖ **Avantage** : Cela réduit encore davantage la fréquence des mises à jour, en particulier pour les utilisateurs se déplaçant fréquemment près des frontières entre TAs incluses dans la liste. Un utilisateur peut traverser plusieurs frontières de TA sans faire de TAU si toutes ces TA sont dans sa liste.
- ❖ **Contrepartie** : Lors du Paging, le réseau doit envoyer les messages de recherche à toutes les cellules de *toutes* les TAs présentes dans la TA List enregistrée pour le terminal, ce qui peut potentiellement élargir la zone de Paging.

La structure hiérarchique **Cellule -> Zone (LA/TA)** est la réponse architecturale fondamentale au dilemme entre joignabilité et efficacité des ressources. En agrégeant la localisation en mode veille au niveau de zones plus larges, les réseaux mobiles parviennent à maintenir la capacité de joindre les terminaux tout en limitant drastiquement la signalisation de mise à jour et la consommation d'énergie associée. Le choix de la taille et de la configuration de ces zones, ainsi que l'utilisation de mécanismes comme la TA List, deviennent des éléments cruciaux de l'ingénierie et de l'optimisation du réseau, qui seront explorés plus en détail dans les parties suivantes.

Ayant établi les fondations – la nécessité de la localisation, le rôle des stations de base comme diffuseurs d'identifiants, celui des entités du cœur réseau comme gestionnaires centraux, et la structure hiérarchique basée sur les cellules regroupées en Zones de Localisation ou de Suivi (LA/TA) – nous sommes maintenant prêts à examiner de plus près les mécanismes dynamiques qui animent cette structure. La Partie II se concentrera sur les procédures clés qui se déroulent au sein de ce cadre, à savoir la mise à jour de zone de suivi (**Tracking Area Update**) lorsque le terminal franchit les frontières définies, et la procédure de recherche (Paging) utilisée par le réseau pour localiser et contacter un terminal en mode veille. Nous analyserons comment ces procédures fonctionnent en détail et leur interrelation avec la configuration des Tracking Areas.

## Partie II : Mécanismes Clés de la Gestion de la Localisation via les Tracking Areas

Après avoir posé les bases conceptuelles et architecturales dans la partie précédente, cette section se consacre à l'analyse détaillée des procédures dynamiques qui permettent au réseau de maintenir une connaissance actualisée de la localisation des terminaux en mode veille, tout en gérant efficacement le compromis entre la charge de signalisation et la joignabilité. Nous nous focaliserons ici sur le rôle central de la **Tracking Area (TA)**, introduite en 4G (LTE) et maintenue en 5G (NR), comme unité de gestion de la localisation pour les terminaux inactifs. Nous décortiquerons les deux processus fondamentaux qui orchestrent cette gestion : la **Mise à Jour de Zone de Suivi (Tracking Area Update - TAU)** ou son équivalent 5G, initiée par le terminal lors de ses déplacements, et la procédure de **Recherche (Paging)**, initiée par le réseau lorsqu'il doit contacter le terminal. L'objectif est de comprendre en profondeur le fonctionnement de ces mécanismes et leur interaction intrinsèque, qui conditionnent

### 5 La Tracking Area (TA) : L'Unité de Gestion de Localisation en 4G/5G

Comme introduit précédemment, la **Tracking Area** est un regroupement logique de plusieurs cellules contiguës, conçu spécifiquement pour gérer la localisation des terminaux en mode veille dans les réseaux à commutation de paquets modernes.

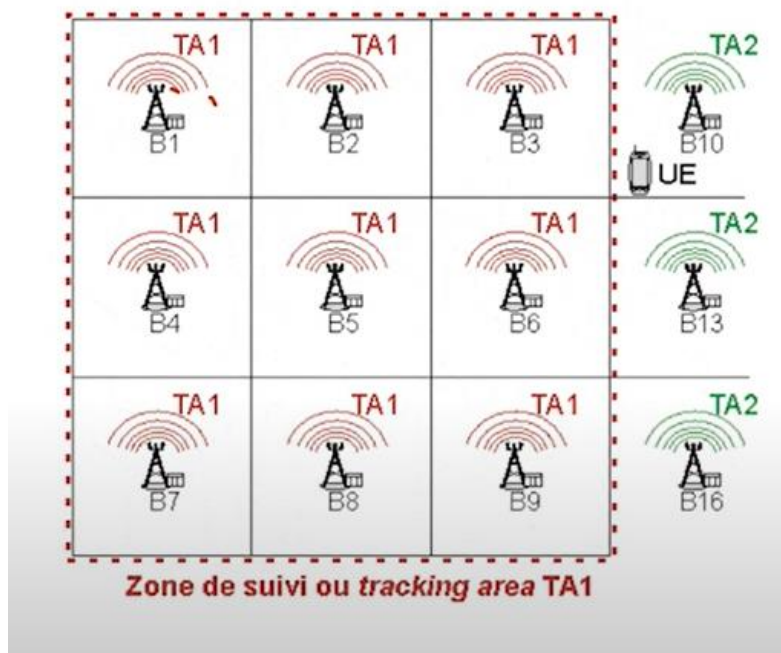


Figure 2 : Tracking area



## 5.1 Rôle Opérationnel : La Zone de "Libre Circulation" en Mode Veille

La fonction essentielle de la TA est de définir une zone géographique à l'intérieur de laquelle un terminal en mode veille (**ECM-IDLE** en 4G, **CM-IDLE** en 5G) peut se déplacer et changer de cellule (via la procédure de **resélection de cellule**) **sans avoir à notifier le cœur de réseau** (MME en 4G, AMF en 5G). Cette "libre circulation" au sein d'une même TA (ou d'un ensemble de TA défini par la TA List) est la clé pour réduire drastiquement la signalisation de mobilité et préserver la batterie du terminal. Le réseau ne maintient la localisation de l'UE qu'au niveau de la TA (ou de la TA List) enregistrée.

## 5.2 Identification: Le Tracking Area Identity (TAI)

Chaque TA est identifiée de manière unique au sein du réseau de l'opérateur (et globalement) par un **Tracking Area Identity (TAI)**. Ce TAI est diffusé par toutes les stations de base (eNodeB/gNodeB) appartenant à cette TA dans leurs messages système (notamment dans le System Information Block Type 1 - SIB1). La structure typique d'un TAI est :

- ❖ **MCC (Mobile Country Code)** : Identifie le pays (ex : 208 pour la France).
  - ❖ **MNC (Mobile Network Code)** : Identifie l'opérateur mobile dans ce pays (ex : 10 pour Orange, 15 pour Free Mobile).
  - ❖ **TAC (Tracking Area Code)** : Identifie de manière unique la TA au sein du réseau de l'opérateur spécifié par le MCC/MNC. Le TAC est la partie variable qui change d'une TA à l'autre chez le même opérateur.
- C'est en lisant le TAI diffusé par la cellule sur laquelle il campe que le terminal sait dans quelle TA il se trouve actuellement et peut décider si une mise à jour de localisation est nécessaire.

## 6 La Mise à Jour de Zone de Suivi (Tracking Area Update - TAU / Registration Update)

Cette procédure est initiée par le terminal pour informer le cœur de réseau (MME/AMF) de sa localisation actuelle au niveau de la TA, ou pour maintenir son enregistrement actif.

### 6.1 Objectif : Informer le Réseau du Changement de Zone

L'objectif principal de la procédure de TAU (en 4G) ou de la procédure de Registration Update (en 5G, qui englobe la mise à jour de localisation) est de permettre au terminal de signaler au MME/AMF qu'il est entré dans une nouvelle zone de suivi qui nécessite une mise à jour de son contexte de localisation enregistré dans le cœur de réseau. Elle sert également à confirmer périodiquement la présence du terminal sur le réseau.

### 6.2 Déclencheurs de la Procédure (Triggers)

Un terminal en mode veille (ECM-IDLE / CM-IDLE) initie une procédure de TAU/Registration Update dans plusieurs scénarios précis :

## Exposé de réseaux mobiles : Gestion de la localisation

- ❖ **Entrée dans une Nouvelle TA non enregistrée (Trigger Principal) :** C'est le cas le plus courant lié à la mobilité. Le terminal lit le TAI de la nouvelle cellule sur laquelle il vient de resélectionner. Il compare ce TAI avec la liste des TAI enregistrés (sa **TA List**) fournie par le MME/AMF lors de sa dernière interaction. Si le TAI de la nouvelle cellule **n'appartient pas** à cette liste, le terminal doit initier une TAU/Registration Update pour signaler son entrée dans cette nouvelle zone "non couverte" par son enregistrement actuel.
- ❖ **Expiration du Timer de Mise à Jour Périodique :** Le réseau configure un timer pour les mises à jour périodiques (Periodic TAU/Registration timer). Lorsque ce timer expire, le terminal doit effectuer une TAU/Registration Update, même s'il n'a pas changé de TA. Cela permet au réseau de vérifier que le terminal est toujours actif et joignable, et de libérer les ressources si le terminal ne répond pas (par exemple, s'il a été éteint ou est sorti de couverture depuis longtemps). La valeur de ce timer est un compromis : trop court, il génère beaucoup de signalisation ; trop long, il augmente le risque de Paging inutile pour des terminaux qui ne sont plus là.
- ❖ **Changement de Technologie d'Accès Radio (RAT) :** Si un terminal passe d'une technologie à une autre (par exemple, de 4G à 5G, ou inversement, ou même vers 2G/3G) et que la zone de localisation (TA ou LA/RA) change dans la nouvelle technologie, une mise à jour de localisation est nécessaire auprès de l'entité de gestion correspondante (MME, AMF, ou MSC/SGSN).
- ❖ **Demandes Spécifiques du Réseau :** Le MME/AMF peut explicitement demander à un terminal d'effectuer une TAU/Registration Update, par exemple pour des raisons de répartition de charge (load balancing) entre MME/AMF, ou pour mettre à jour certains paramètres de configuration.
- ❖ **Certains Services en Mode Veille :** L'initiation de certains services par l'utilisateur en mode veille peut également déclencher implicitement une mise à jour de sa localisation si nécessaire.

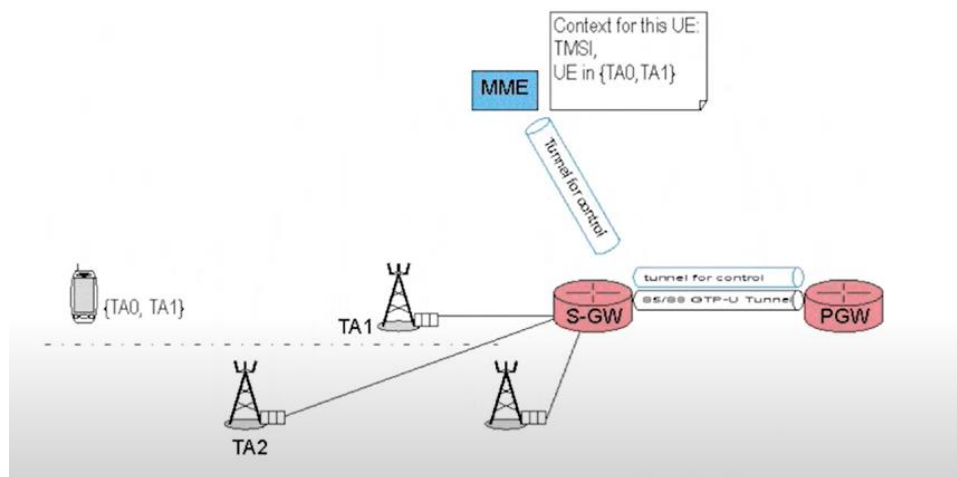


Figure 3 : Illustration : changement de tracking area 1/2



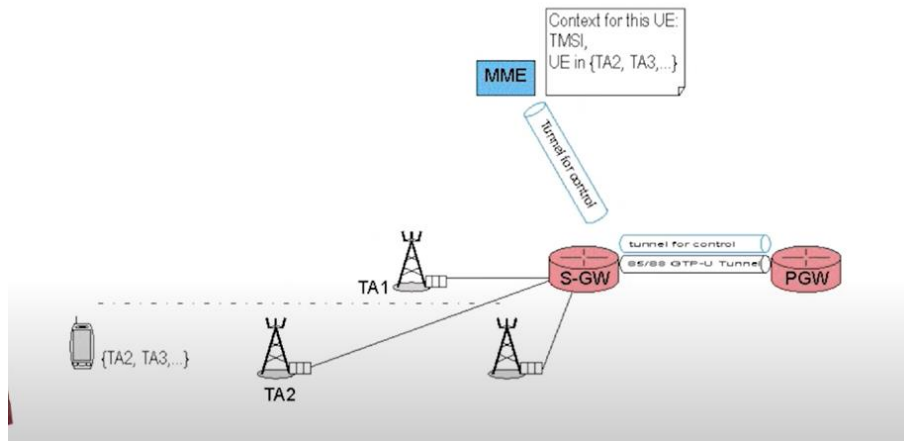


Figure 4 illustration : changement de tracking area 2/2

### 6.3 Déroulement Typique de la Procédure (Exemple simplifié 4G TAU)

Le déroulement exact peut varier légèrement (notamment entre 4G et 5G), mais les étapes fondamentales sont les suivantes :

1. **Détection par l'UE** : Le terminal, en mode **ECM-IDLE**, resélectionne une nouvelle cellule (Cellule B) car son signal est meilleur que celui de l'ancienne cellule (Cellule A).
2. **Lecture du TAI** : L'UE lit le TAI diffusé par la Cellule B dans ses messages système (SIB1).
3. **Comparaison** : L'UE compare le TAI de la Cellule B avec la TA List enregistrée dans sa mémoire. Supposons que le TAI de la Cellule B n'est pas dans la liste.
4. **Initiation de la TAU** : L'UE décide d'initier une procédure de TAU. Il établit une connexion radio minimale avec l'eNodeB de la Cellule B et envoie un message TAU Request. Ce message contient typiquement :
  - L'identité temporaire de l'UE (GUTI - Globally Unique Temporary Identity, qui inclut l'identifiant du MME précédent).
  - Le dernier TAI visité (celui de la Cellule A).
  - Le type de mise à jour (ex : "TA updating").
  - Les capacités de l'UE (pour que le réseau connaisse ses fonctionnalités).
5. **Relais par l'eNodeB** : L'eNodeB de la Cellule B encapsule le TAU Request dans un message S1AP (protocole de l'interface S1-MME) et le transmet au MME qui servait l'UE (identifié via la partie MMEI du GUTI) ou, si ce MME n'est pas joignable ou si l'eNodeB est connecté à un autre MME, il le route vers un MME approprié (qui devra peut-être récupérer le contexte).
6. **Traitement par le MME** :
  - Le MME reçoit la requête et identifie le contexte de l'UE grâce au GUTI.
  - Il effectue des contrôles de sécurité (peut lancer une nouvelle authentification si nécessaire).

- Il met à jour l'information de localisation de l'UE en enregistrant le nouveau TAI (celui de la Cellule B).
  - **Interaction HSS (si changement de MME) :** Si la TAU implique un changement de MME (l'UE arrive dans une zone gérée par un nouveau MME), le nouveau MME contacte le HSS pour obtenir les informations d'abonnement de l'UE et pour notifier le HSS qu'il est désormais le MME servant cet UE. Le HSS met à jour l'adresse du MME pour cet abonné. L'ancien MME est informé pour libérer le contexte.
  - **Allocation de la nouvelle TA List :** Le MME décide de la nouvelle TA List à assigner à l'UE. Cette liste peut contenir uniquement le TAI de la Cellule B, ou inclure également les TAI des TAs voisines, en fonction des politiques de l'opérateur et potentiellement des informations de mobilité de l'UE. C'est une étape clé pour l'optimisation future.
  - **Allocation d'un nouveau GUTI (optionnel) :** Le MME peut allouer un nouveau GUTI à l'UE pour des raisons de sécurité et de confidentialité.
7. **Réponse du MME :** Le MME envoie un message TAU Accept à l'UE via l'eNodeB. Ce message contient :
- La nouvelle TA List assignée.
  - Le nouveau GUTI (si alloué).
  - D'autres informations de configuration si nécessaire.
8. **Confirmation par l'UE :** L'UE reçoit le TAU Accept, stocke la nouvelle TA List et le nouveau GUTI. Il peut envoyer un message TAU Complete si requis par le MME (par exemple, si un nouveau GUTI a été alloué).
9. **Fin de la procédure :** L'UE retourne en mode ECM-IDLE, mais désormais enregistré dans la nouvelle TA (ou avec la nouvelle TA List). La connexion radio minimale est libérée.

### 6.4 Le Rôle Crucial de la TA List

L'introduction de la TA List est une optimisation significative par rapport aux anciennes LA/RA.

- ❖ **Principe :** Au lieu d'enregistrer l'UE dans une seule TA, le réseau lui fournit une liste de TAI (souvent 8, 16 ou plus, selon la configuration).
- ❖ **Fonctionnement :** Tant que l'UE se déplace entre des cellules appartenant à des TAs dont les TAI sont *tous* dans sa liste enregistrée, il n'effectue **aucune** TAU. Il ne déclenche la procédure que lorsqu'il entre dans une TA dont le TAI est *extérieur* à cette liste.
- ❖ **Bénéfice :** Réduit considérablement le nombre de TAU pour les utilisateurs se déplaçant autour des frontières de TAs, zones où les mises à jour seraient autrement très fréquentes. Cela économise massivement la batterie et la signalisation, surtout dans les zones de forte mobilité ou lorsque les TAs sont relativement petites.
- ❖ **Inconvénient potentiel :** Comme le réseau ne sait pas dans quelle TA *spécifique* de la liste se trouve l'UE, il devra effectuer le Paging sur l'ensemble des TAs de la liste (voir section suivante).

## 7 La Procédure de Recherche (Paging)

Le Paging est le mécanisme utilisé par le réseau pour localiser et contacter un terminal qui se trouve en mode veille (ECM-IDLE / CM-IDLE) afin de lui délivrer une communication entrante (appel vocal, SMS, données) ou une signalisation importante.

### 7.1 Objectif : Retrouver et "Réveiller" un Terminal en Veille

Lorsqu'un terminal est en mode veille, il n'a pas de connexion radio ou de signalisation active permanente avec le réseau afin d'économiser son énergie. Le Paging est la procédure qui permet au cœur de réseau (MME/AMF) de demander à l'ensemble des stations de base couvrant la zone où le terminal est supposé se trouver (sa dernière TA ou TA List enregistrée) de diffuser un message d'appel spécifique à ce terminal. Si le terminal reçoit ce message, il doit répondre et établir une connexion pour recevoir la communication.

### 7.2 Déclencheurs de la Procédure (Triggers)

Le Paging est typiquement initié par le MME/AMF lorsqu'il reçoit une indication qu'une communication est en attente pour un terminal en mode veille :

- **Données descendantes (Downlink Data) :** Le plus courant en 4G/5G. Lorsque des paquets de données arrivent au niveau du S-GW (4G) ou de l'UPF (5G) et que le terminal est en mode veille (pas de bearer S1-U/NG-U actif), le S-GW/UPF envoie une notification ("Downlink Data Notification") au MME/AMF.
- **Appel vocal ou SMS entrant (Circuit Switched Fallback ou VoLTE/VoNR) :** Pour un appel vocal ou un SMS arrivant via le réseau historique (MSC) ou via l'IMS (pour VoLTE/VoNR), le MME/AMF est notifié et doit "pager" le terminal pour qu'il puisse recevoir l'appel/SMS.
- **Signalisation spécifique du réseau :** D'autres types de signalisation initiée par le réseau peuvent nécessiter de contacter le terminal en mode veille.

### 7.3 Déroulement Typique de la Procédure (Exemple simplifié 4G)

- ✓ **Notification au MME :** Le MME reçoit une indication (ex: Downlink Data Notification du S-GW) qu'il doit contacter un UE spécifique (identifié par son S-TMSI ou IMSI) qui est actuellement en état ECM-IDLE.
- ✓ **Détermination de la Zone de Paging :** Le MME consulte le contexte de l'UE et récupère la **TA List** qui lui est actuellement assignée. La zone de Paging correspondra à l'ensemble des cellules appartenant à *toutes* les TAs de cette liste.
- ✓ **Envoi des Requêtes de Paging aux eNodeBs :** Le MME construit un message de Paging contenant l'identité de l'UE à rechercher (généralement le S-TMSI pour la confidentialité) et le type de trafic (ex: données ou voix CS). Il envoie ce message (via S1AP Paging) à **tous les eNodeBs** qui desservent des cellules appartenant à au moins une des TAs de la TA List de l'UE.
- ✓ **Calcul des Occasions de Paging par l'eNodeB :** Chaque eNodeB recevant la requête de Paging calcule les moments précis (trames et sous-trames radio spécifiques) où l'UE est censé écouter le canal de Paging (PCH - Paging Channel). Ce calcul est basé sur l'identité de l'UE et les paramètres de **DRX (Discontinuous Reception)** configurés

pour ce terminal, permettant à l'UE de dormir la plupart du temps et de ne se réveiller que brièvement pour écouter le Paging.

- ✓ **Diffusion Radio du Message de Paging** : Aux moments calculés (Paging Occasion - PO), chaque eNodeB concerné diffuse le message de Paging sur le PCH dans toutes ses cellules appartenant aux TAs ciblées. Ce message contient la liste des identités des UE recherchés dans cette occasion.
- ✓ **Écoute par l'UE** : L'UE en mode ECM-IDLE se réveille périodiquement selon son cycle DRX, juste avant ses Paging Occasions calculées, et écoute le PCH.
- ✓ **Détection et Réponse de l'UE** : Si l'UE détecte son identité (S-TMSI) dans un message de Paging reçu, il sait qu'il doit contacter le réseau. Il initie alors une procédure de **Service Request** vers le MME (via l'eNodeB de la cellule où il se trouve actuellement). Cette procédure vise à établir les connexions de signalisation (S1-MME) et les bearers radio et S1-U nécessaires pour recevoir la communication entrante.
- ✓ **Transition vers le Mode Connecté** : Suite à la procédure de Service Request réussie, l'UE passe de l'état ECM-IDLE à l'état ECM-CONNECTED. Les données descendantes peuvent maintenant être transmises, ou l'appel vocal peut être établi.
- ✓ **Absence de Réponse** : Si l'UE ne répond pas au Paging (parce qu'il est hors couverture, éteint, ou a manqué le message), le MME peut retenter la procédure un certain nombre de fois. Si les tentatives échouent, la communication entrante est généralement abandonnée (l'appelant obtient une tonalité d'occupation ou un message d'indisponibilité, les données peuvent être mises en tampon ou rejetées).

### 7.4 L'Impact de la TA List sur le Paging

Si la TA List réduit la fréquence des TAU, elle a l'effet inverse sur le Paging :

- ❖ **Élargissement de la Zone de Recherche** : Le Paging doit être diffusé dans *toutes* les cellules de *toutes* les TAs incluses dans la liste. Plus la liste est longue (couvre une grande zone géographique), plus le nombre de cellules impliquées dans la diffusion du Paging est élevé.
- ❖ **Augmentation de la Charge Radio** : Chaque message de Paging consomme des ressources sur le canal PCH. Une zone de Paging plus large signifie que ces ressources sont consommées sur un plus grand nombre de cellules simultanément pour rechercher un seul utilisateur. Cela peut devenir une charge significative, surtout dans les zones denses avec de nombreux utilisateurs en mode veille à rechercher.
- ❖ **Optimisation du Paging** : Des mécanismes existent pour optimiser le Paging (par exemple, Paging DRX, stratégies de répétition intelligentes), mais l'étendue géographique définie par la TA List reste le facteur principal déterminant la charge initiale.

## 8 Interrelation et Impact sur la Signalisation : Le Compromis Dynamique

Les procédures de TAU/Registration Update et de Paging sont les deux faces de la même médaille : la gestion de la localisation en mode veille. Leur fonctionnement et leur fréquence sont directement influencés par la configuration des Tracking Areas et des TA Lists, illustrant le compromis fondamental :

- **Configuration avec de Grandes TA / Longues TA Lists :**
  - ❖ **Avantage :** Réduit significativement la fréquence des TAU/Registration Updates car l'UE peut se déplacer sur de plus grandes distances sans informer le réseau. → **Moins de signalisation de mise à jour, meilleure autonomie de la batterie.**
  - ❖ **Inconvénient :** Augmente la zone de Paging. Le réseau doit interroger un plus grand nombre de cellules pour retrouver l'UE. → **Plus de charge de Paging** sur le réseau radio, potentiellement un léger **retard** avant que l'UE ne réponde s'il est loin du point d'entrée des données/appel.
- **Configuration avec de Petites TA / Courtes TA Lists (voire une seule TA) :**
  - ❖ **Avantage :** Réduit la zone de Paging. Le réseau peut cibler plus précisément où chercher l'UE. → **Moins de charge de Paging**, potentiellement une **réponse plus rapide** de l'UE.
  - ❖ **Inconvénient :** Augmente considérablement la fréquence des TAU/Registration Updates, surtout pour les utilisateurs mobiles, car les frontières des TAs sont franchies plus souvent. → **Plus de signalisation de mise à jour, consommation de batterie accrue.**

L'impact sur la **signalisation réseau** est donc double :

- La signalisation liée aux **mises à jour** (TAU/Registration Update) est générée par l'UE et traitée par les eNodeB/gNodeB, le MME/AMF, et potentiellement le HSS/UDM. Sa fréquence dépend de la taille des TAs/TA Lists et de la mobilité des utilisateurs.
- La signalisation liée au **Paging** est générée par le MME/AMF et diffusée par les eNodeB/gNodeB sur l'interface radio. Sa charge dépend de la taille de la zone de Paging (définie par la TA/TA List) et de la fréquence des communications entrantes pour les utilisateurs en mode veille.

Trouver le bon équilibre entre ces deux types de signalisation et leurs impacts respectifs est un défi majeur pour les opérateurs de réseaux mobiles.

Après avoir disséqué les mécanismes fondamentaux de mise à jour (TAU/Registration Update) et de recherche (Paging) qui opèrent dans le cadre des Tracking Areas, et avoir mis en lumière le compromis inhérent lié à la configuration de ces zones, il devient évident que l'optimisation de ces processus est cruciale pour la performance et l'efficacité des réseaux 4G et 5G. La Partie III explorera précisément les défis posés par cette gestion et les différentes stratégies et techniques, des plus classiques aux plus avancées (basées sur l'IA), mises en œuvre par les opérateurs pour optimiser la configuration des Tracking Areas, minimiser la signalisation excessive, et améliorer l'expérience utilisateur tout en préservant les ressources du réseau. Nous comparerons également les approches et capacités spécifiques de la 4G et de la 5G dans ce domaine.

# Partie III : Défis, Optimisation et Évolution de la Gestion des Tracking Areas

L'optimisation de la gestion des **Tracking Areas** (TAs) est cruciale pour l'efficacité des réseaux mobiles 4G et 5G. Une mauvaise gestion entraîne une signalisation excessive (principalement via les procédures de Tracking Area Update - TAU), ce qui consomme des ressources radio et cœur de réseau, augmente la latence potentielle pour certains services et draine la batterie des terminaux (UEs).

Le cœur du problème est de maintenir la localisation des terminaux (UEs) qui ne sont pas activement en communication (états Idle en 4G, Idle ou Inactive en 5G) avec une précision suffisante pour pouvoir les contacter rapidement (paging) lorsqu'une donnée ou un appel leur est destiné, tout en minimisant la signalisation de mise à jour de localisation (TAU/RAU) générée par leurs déplacements. Un équilibre doit être trouvé entre :

- **Charge de Signalisation de Mise à Jour (TAU/RAU) :** Trop de mises à jour satureront les interfaces radio (air) et cœur de réseau (interfaces S1-MME/N2), consomment les ressources des MME/AMF et réduisent l'autonomie des UEs.
- **Charge de Signalisation de Paging :** Des zones de localisation trop grandes nécessitent d'envoyer des messages de paging sur un grand nombre de cellules, consommant les ressources du canal Paging (radio) et augmentant potentiellement le délai de réponse de l'UE.

## 9 Configuration Optimale des TAs

L'objectif réduire les mises à jour inutiles (TAU/RAU) tout en assurant un paging efficace

Approche :

### 9.1 Le Compromis Taille vs Paging:

- **Petites TAs :** Précision de localisation élevée.

**Avantages :** Un Paging efficace (peu de cellules sollicitées), utile dans les zones très denses où la charge de paging peut être un goulot d'étranglement.

**Inconvénients :** TAU fréquents même pour de courts déplacements, surtout si les frontières coupent des axes de mobilité naturels.

- **Grandes TAs :** Réduction drastique des TAU.

**Avantages :** Moins de charge sur le MME/AMF et sur l'interface radio pour la signalisation TAU.



## Exposé de réseaux mobiles : Gestion de la localisation

**Inconvénients** : Une charge de paging potentiellement très élevée, pouvant saturer le canal Paging et augmenter la latence d'établissement d'appel/session. Risque accru d'échec de paging si l'UE est dans une zone de mauvaise couverture à l'intérieur de la grande TA.

La figure suivante présente la structure TAL d'un zoom

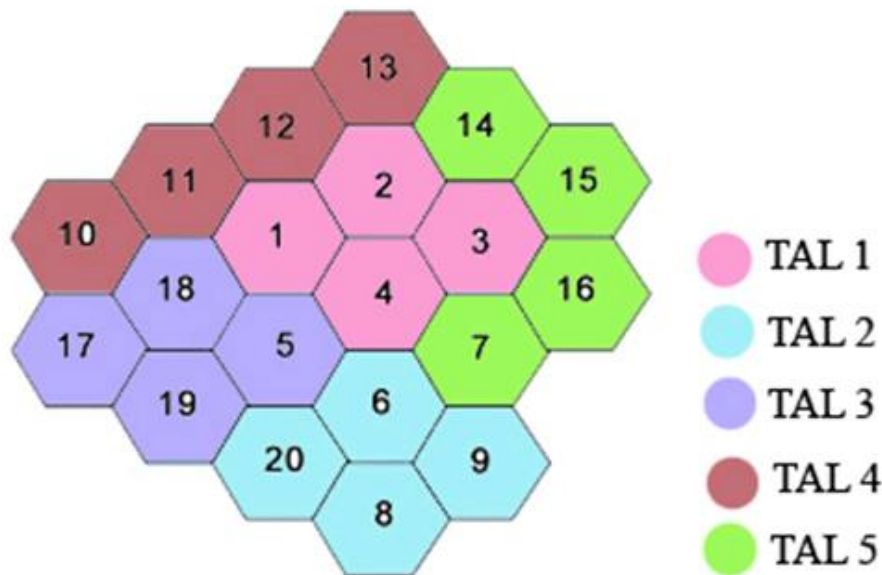


Figure 5 : structure TAL d'un zoom

### 9.2 Choix de la Planification:

Ce processus stratégique vise à établir un équilibre optimal entre réduction de la signalisation et efficacité du paging. L'objectif de la planification est de :

- ❖ **Minimiser les TAU/RAU** : Réduire les mises à jour inutiles tout en maintenant une localisation suffisamment précise
- ❖ **Optimiser le paging** : Limiter le nombre de cellules sollicitées pour localiser un UE
- ❖ **Adapter aux caractéristiques locales** : Prendre en compte la géographie, la mobilité et la densité du trafic
- ❖ **Anticiper l'évolution réseau** : Prévoir les extensions futures et l'évolution des usages

Elle comprend plusieurs approches :

#### 9.2.1 Approche géographique

Elle s'appuie sur une combinaison de données géographiques, morphologiques et radio pour optimiser le découpage des Tracking Areas. Les données géographiques incluent :

- ❖ La classification des zones (urbain dense, suburbain, rural)

- ❖ L'identification des environnements (indoor/outdoor)
- ❖ Le recensement des obstacles naturels (relief, végétation) et artificiels (bâtiments)
- ❖ Cartographie des infrastructures de transport (réseaux routiers, ferroviaires, aéroports).

Ces informations sont complétées par des données de couverture radio comprenant des modélisations prédictives, des résultats de mesures terrain (drive tests), et des paramètres radio spécifiques par cellule comme la puissance du signal (RSRP) et sa qualité (RSRQ/SINR).

L'analyse croisée de ces différents jeux de données :

### 9.2.1.1 Découpage Morphologique

Cette étape consiste à structurer les TAs en fonction des caractéristiques physiques et géographiques de l'environnement.

#### a) Alignement sur les frontières naturelles

- **Fleuves/étendues d'eau** : Les cours d'eau constituent des frontières naturelles idéales pour les TAs, car ils :
  - Réduisent les besoins de couverture radio inter-TA (moins de cellules traversantes).
  - Liminent les interférences entre zones adjacentes.
- **Relief (montagnes, collines)** :
  - Les zones montagneuses peuvent être isolées dans des TAs dédiées pour éviter des handovers fréquents dus aux variations de couverture.
  - Les vallées peuvent former des TAs linéaires suivant les axes de mobilité naturels.

#### b) Correspondance avec les infrastructures de transport

- **Routes/Autoroutes** :
  - Création de TAs allongées le long des axes routiers majeurs pour minimiser les TAU des UEs en mouvement rapide.
  - Exclusion des zones adjacentes peu fréquentées pour éviter un paging excessif.
- **Voies ferrées** :
  - Les TAs peuvent suivre les tracés ferroviaires avec une largeur adaptée à la portée radio le long des rails.
- **Aéroports** :
  - Découpage spécifique pour les terminaux (TA indoor dense) vs. pistes (TA étendue à faible trafic).

#### c) Distinction urbain/périurbain/rural

- **Urbain dense** :
  - TAs de petite taille (10-20 cellules) pour un paging précis.



## Exposé de réseaux mobiles : Gestion de la localisation

- Prise en compte des bâtiments (shadowing) et de la 3D (étages).
- **Périurbain :**
  - TAs de taille moyenne, intégrant zones résidentielles et axes de transit.
- **Rural :**
  - TAs larges (50+ cellules) pour limiter les TAU, avec ajustement en fonction de la topographie.

### 9.2.1.2 Zonage Radio

Cette phase optimise le regroupement des cellules en TAs selon leurs performances radio.

#### a) Regroupement des cellules avec couverture homogène

- **Critères de similarité :**
  - Niveaux de signal (RSRP) comparables ( $\pm 5$  dBm).
  - Qualité de service homogène (RSRQ/SINR dans la même plage).
- **Méthodes :**
  - Clustering automatique (algorithme K-means sur les mesures radio).
  - Exclusion des cellules en bordure de couverture pour éviter les TAU fréquents.

#### b) Respect des limites de couverture effective

- **Définition des frontières TA :**
  - Placées dans les zones où le RSRP chute en dessous de -110 dBm (limite de service).
  - Éviter les chevauchements excessifs entre TAs adjacentes.
- **Outils :**
  - Cartes de couverture générées par des logiciels (Atoll, Planet).
  - Validation par drive tests.

#### c) Prise en compte des shadowing areas

- **Zones d'ombre critiques :**
  - À l'intérieur d'un même TA pour éviter les TAU dus aux fluctuations temporaires.
  - Exemple : Un tunnel routier entier inclus dans une seule TA, même si la couverture y est intermittente.
- **Corrections :**
  - Ajout de small cells pour homogénéiser la couverture avant le découpage.

### Exemple Pratique

**Scénario :** Planification d'une TA le long d'une autoroute traversant une zone urbaine.

#### 1. Découpage morphologique :

- La TA suit l'autoroute sur 10 km, incluant les échangeurs mais excluant les quartiers adjacents.
- Les tunnels sont entièrement inclus dans la TA.

#### 2. Zonage radio :

- Regroupement des cellules avec RSRP > -95 dBm le long de l'axe.
- Exclusion d'une cellule en bordure de couverture (-112 dBm) pour éviter les TAU aux sorties.

**Résultat :**

- Réduction de 30% des TAU par rapport à un découpage purement géométrique.
- Paging limité aux cellules autoroutières (économie de ressources radio).

### 9.2.2 Approche par mobilité

Elle analyse les schémas de mobilité des utilisateurs et permet de définir des TAs qui minimisent les mises à jour tout en maintenant une localisation efficace. Cette approche repose sur trois piliers principaux :

#### 9.2.2.1 Analyse des Matrices de Handover

**Objectif :** Comprendre les trajectoires fréquentes des utilisateurs entre cellules.

##### a) Identification des paires de cellules fréquemment traversées

- Construction d'une matrice origine-destination pour tous les handovers
- Détection des "couples" de cellules avec taux de transition élevé (>20% du trafic)
- Exemple : Si Cell\_A → Cell\_B représente 30% des handovers sortants de Cell\_A, ces cellules devraient idéalement être dans la même TA

##### b) Calcul des probabilités de transition

- Modélisation Markovienne des déplacements
- Calcul des probabilités conditionnelles  $P(\text{Cell\_B}|\text{Cell\_A})$
- Seuil critique : Probabilité >15% justifie un regroupement en TA commune

#### 9.2.2.2 Détection des Flux Dominants

##### a) Axes Pendulaires (Domicile-Travail)

## Exposé de réseaux mobiles : Gestion de la localisation

- Analyse temporelle des handovers (heures de pointe)
- Identification des corridors de mobilité récurrents
- Stratégie : Création de TAs allongées suivant ces axes

### b) Zones de Transit Majeur

- **Gares** : TAs circulaires concentriques
  - Zone cœur (quai) → petite TA haute densité
  - Périphérie (accès) → TA plus large
- **Autoroutes** : TAs linéaires avec buffer de 500m-1km
  - Adaptation selon vitesse moyenne (110km/h → TA de 10-15km)

### Cas Pratique :

- Pour un axe autoroutier avec trafic de 5,000 véhicules/heure :
  - Longueur TA optimale  $\approx 12\text{km}$  (évite les TAU fréquents à 120km/h)
  - Largeur  $\approx 800\text{m}$  (couvre la voie + zones de service)

#### 9.2.2.3 Données Clés et Métriques

Métrique	Description	Impact sur les TAs
Taux de handover	% de UEs passant de Cell_A à Cell_B	Regroupement si >15-20%
Durée moyenne de séjour	Temps moyen dans une cellule	TAs plus petites si <5min (zones de transit)
Vitesse estimée	Dérivée du temps inter-cellule	TAs allongées si >60km/h
Directionnalité	Angle moyen des handovers	Alignement des TAs selon le flux dominant

Figure 6 : Données Clés et Métriques

### Outils d'Analyse :

1. **Heatmaps de mobilité** :
  - ❖ Visualisation des corridors de déplacement
  - ❖ Identification des "frontières naturelles" entre flux
2. **Algorithmes de clustering** :
  - ❖ DBSCAN pour détection des zones de forte interconnectivité
  - ❖ Louvain method pour communauté de mobilité

Cette approche data-driven permet d'adapter dynamiquement les TAs aux schémas réels de mobilité, plutôt qu'à des limites géographiques arbitraires.

### 9.2.3 Approche par charge

Cette méthode vise à optimiser les TAs en fonction des contraintes de capacité réseau et de la charge de signalisation, avec un objectif d'équilibrage des ressources.

#### 9.2.3.1 Équilibrage des Ressources

##### a) Répartition homogène de la charge TAU

- ❖ **Analyse historique** : Mesure du taux de TAU par TA (par minute)
- ❖ **Seuil critique** :
  - TA surchargée : >60 TAU/min
  - TA sous-utilisée : <20 TAU/min
- ❖ **Actions correctives** :
  - Pour une TA surchargée :
    - Scinder la TA en deux (si topologie le permet)
    - Étendre la TAL (Tracking Area List) attribuée aux UEs
  - Pour une TA sous-utilisée :
    - Fusion avec une TA adjacente
    - Réaffectation de cellules périphériques

##### b) Limitation des pics de paging

- **Calcul du facteur de paging** :
$$\text{Paging\_load} = \text{Nombre d'UEs dans la TA} \times \text{Fréquence de paging}$$
- **Stratégies** :
  - Si >30 cellules/paging → Scinder la TA
  - Activation de "Paging Grouping" pour les TAs larges
  - Adaptation dynamique des zones de paging en heures de pointe

#### 9.2.3.2 Considération des Capacités

##### a) Capacité maximale des MME/AMF

- **Paramètres clés** :
  - Nombre maximal de TAU simultanés (ex: 10,000/min pour un MME standard)
  - Mémoire disponible pour le stockage des contextes UE
- **Règle de dimensionnement** :

$$TA\_count = \frac{(MME\_capacity \times Safety\_margin)}{Average\_TAU\_rate}$$

(Typiquement 15-20% de marge)

**b) Limites des canaux paging**

- **Calcul de capacité :**
  - NR : 16 PO (Paging Occasions) par frame (10ms)
  - LTE : PHICH/PCFICH limitations
- **Optimisation :**
  - Répartition des pics de paging sur le temps (DRX configuration)
  - Priorisation des paging URLLC sur eMBB

**9.2.3.3 Tableau d'Optimisation Multi-Critères**

Critère	Poids	Objectif	Méthode de Calcul	Outil de Mesure
TAU/min	0.6	< 50	COUNT(TAU_events)/time_interval	Sonde S1-MME/N2
Cellules/paging	0.3	< 30	MAX(cells_involved_in_paging)	Paging Analyzer
Charge MME	0.1	< 70%	(Active_sessions/Total_capacity)×100	NMSC Platform

*Figure 7: Tableau d'Optimisation Multi-Critères*

**9.2.3.4 Cas Pratique : Optimisation d'une Zone Urbaine**

**Problème initial :**

- ❖ TA\_15 (centre-ville) :
  - ❖ 85 TAU/min
  - ❖ 45 cellules/paging
  - ❖ Charge MME à 80%

**Actions entreprises :**

1. **Scinder la TA :**
  - ❖ Nouvelle TA\_15a : Zone commerciale (35 TAU/min)
  - ❖ Nouvelle TA\_15b : Zone résidentielle (40 TAU/min)
2. **Ajustement des TALs :**
3. **Résultats après 24h :**
  - ❖ TAU totaux : ↓ 38%

- ❖ Cellules/paging max : 28
- ❖ Charge MME : 65%

### 5. Outils Spécifiques

- **SON (Self-Organizing Networks) :**
  - Boucle MRO (Mobility Robustness Optimization)
  - Algorithmes de load-balancing automatique
- **Analyse Prédictive :**

Cette approche technique permet un équilibrage dynamique entre performance réseau, qualité de service et longévité des équipements, tout en respectant les contraintes physiques du système.

## 10 Algorithmes d'Optimisation Basés sur l'IA et le Machine Learning (ML)

L'IA/ML fournit les outils pour analyser des données complexes et mettre en œuvre des stratégies dynamiques et prédictives efficaces.

### 10.1 Cas d'Usage Spécifiques :

#### ❖ **Prédiction Fine de la Mobilité :**

- *Inputs* : Séquences de cellules visitées, heure, type d'UE, données contextuelles (trafic routier, événements).
- *Modèles* : Réseaux de Neurones Récurrents (RNN, LSTM, GRU), Transformers (pour capturer les dépendances longues distances), Modèles de Markov Cachés (HMM).
- *Outputs* : Probabilité de la prochaine cellule/TA, prédiction de trajet, recommandation de TAL optimale.

#### ❖ **Clustering Optimal de Cellules pour TAs Statiques :**

- *Inputs* : Matrices de handover, données de TAU, contraintes géographiques, densité de population/trafic.
- *Modèles* : K-Means, DBSCAN, Spectral Clustering, algorithmes basés sur les graphes (détection de communautés).
- *Outputs* : Proposition de découpage optimal des cellules en TAs minimisant les traversées de frontières pondérées par le coût du paging.

#### ❖ **Optimisation Dynamique des TALs via Apprentissage par Renforcement (RL) :**

- *Agent* : Le MME/AMF (ou une fonction associée).
- *État* : Localisation actuelle de l'UE, historique de mobilité, charge réseau locale.
- *Action* : Assigner une TAL spécifique à l'UE.

## Exposé de réseaux mobiles : Gestion de la localisation

- *Récompense* : Fonction objectif combinant la minimisation des TAU futurs (prédits ou observés) et la limitation de la charge de paging induite par la taille de la TAL.
- *Objectif* : Apprendre une politique d'assignation de TALs qui maximise la récompense à long terme.

### ❖ Détection d'Anomalies et Diagnostic :

- *Inputs* : Taux de TAU/RAU par cellule/TA, taux d'échec de paging, latences.
- *Modèles* : Algorithmes de détection de valeurs aberrantes (Isolation Forest, One-Class SVM), analyse de séries temporelles.
- *Outputs* : Alertes sur des zones à signalisation excessive, aide à identifier les causes (mauvaise configuration TA/TAL, problème radio localisé, etc.).

## 10.2 Intégration dans l'Architecture Réseau :

- ❖ **SON (Self-Organizing Networks)** : Les fonctions IA/ML peuvent alimenter les boucles SON pour l'optimisation de la mobilité (MRO - Mobility Robustness Optimization, MLB - Mobility Load Balancing incluant la gestion des TAs/TALs).
- ❖ **NWDAF (Network Data Analytics Function) en 5G** : Fonction native de l'architecture 5G conçue pour collecter des données réseau, effectuer des analyses (potentiellement basées IA/ML) et fournir des insights ou des recommandations aux autres fonctions réseau (comme l'AMF pour l'optimisation des TALs/RAs).

## 10.3 Défis de l'IA/ML :

- ❖ **Qualité et Volume des Données** : Nécessite des données de mobilité précises, volumineuses et représentatives (respectant la vie privée).
- ❖ **Complexité des Modèles** : Entraînement coûteux, besoin de ressources de calcul pour l'inférence en temps réel.
- ❖ **Explicabilité** : Comprendre pourquoi l'IA prend une décision spécifique peut être difficile (boîtes noires), mais est important pour la confiance et le débogage.
- ❖ **Robustesse** : Les modèles doivent être robustes aux changements de conditions réseau et de comportement des utilisateurs non vus pendant l'entraînement.

## 11 Comparaison : Gestion en 4G (LTE) vs 5G (NR)

La **gestion de la mobilité inactive** constitue un axe stratégique d'optimisation dans les réseaux mobiles. L'arrivée de la **5G** introduit des concepts novateurs qui déplacent une partie de la gestion de la mobilité du cœur vers la RAN (Réseau d'Accès Radio), réduisant ainsi la signalisation centrale et améliorant la réactivité tout en préservant l'autonomie des équipements.

## 11.1 Architecture Réseau

### 11.1.1 4G LTE

Basée sur une architecture EPC (Evolved Packet Core) centralisée ;Le **eNodeB** (station de base) gère à la fois le contrôle et l'utilisateur ;L'ensemble du trafic passe par un cœur réseau unique.

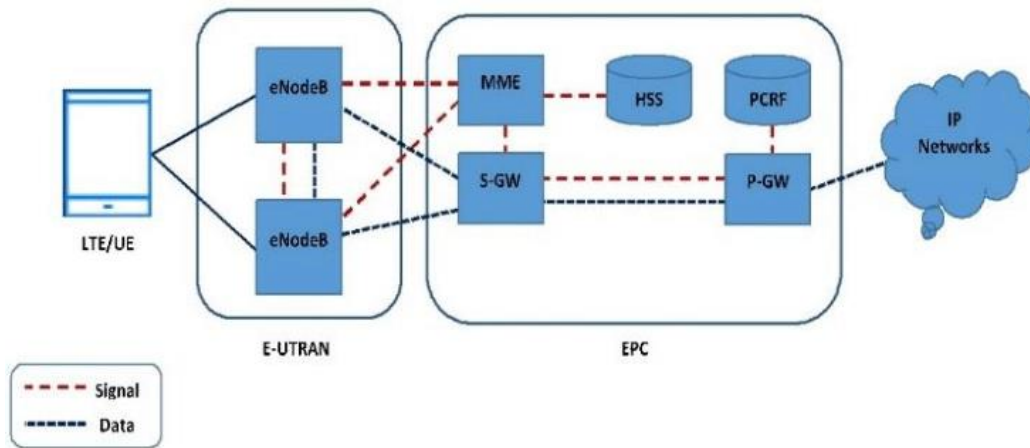


Figure 8 : Architecture 4G - LTE

### 11.1.2 5G NR

Repose sur une **architecture "Service-Based" (SBA)** ;Découplage entre plan de contrôle et plan utilisateur grâce au **CUPS (Control and User Plane Separation)** ;Introduction du **gNodeB** et de la **Network Function Virtualization (NFV)**.

Plus modulaire : les fonctions réseau sont distribuées et virtualisées (ex. AMF, SMF, UPF, etc.).

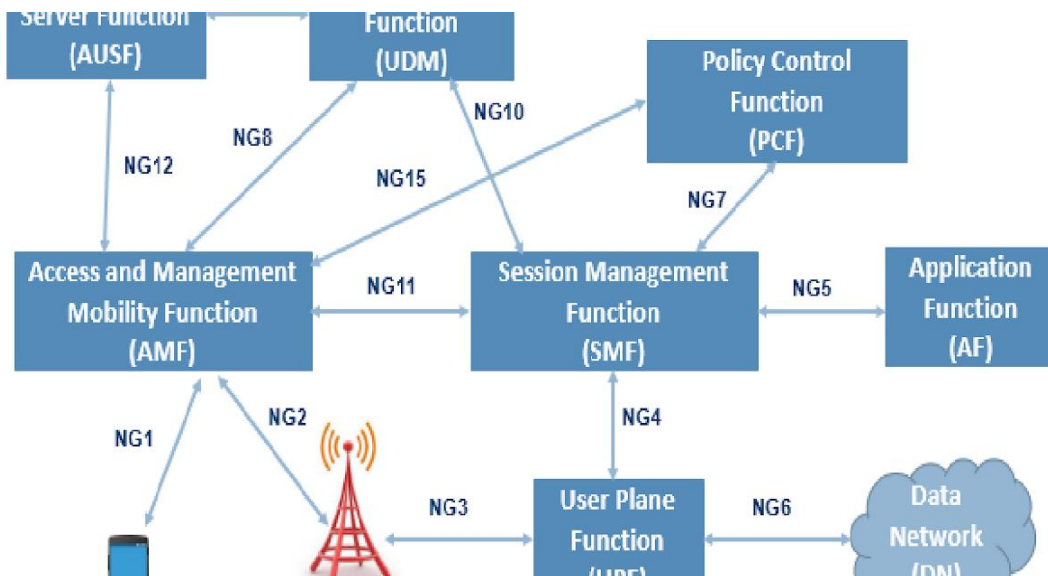


Figure 9 : Structure 5G NR



## 11.2 Terminologie et Fonctions de Gestion de la Mobilité

Éléments	4G LTE (EPC)	5G NR (5GC)
<b>Entité de gestion</b>	MME (Mobility Management Entity)	AMF (Access and Mobility Management Function)
<b>Zones</b>	TA, TAI, TAL	TA, TAI, TAL (réutilisés), et <b>RA</b> (Registration Area)
<b>Mécanisme de MAJ</b>	TAU (Tracking Area Update)	RAU (Registration Area Update)
<b>États de mobilité</b>	ECM-IDLE / ECM-CONNECTED	CM-IDLE / CM-CONNECTED / <b>RRC_INACTIVE</b>

*Figure 10 : Terminologie et Fonctions de Gestion de la Mobilité*

## 11.3 Comparaison : TAU (4G) vs RAU et RNAU (5G)

Mécanisme	4G LTE	5G NR
<b>Mise à jour principale</b>	TAU vers le MME	RAU vers l'AMF
<b>Mise à jour locale</b>	N/A	RNAU entre UE et gNB
<b>Économie de signalisation</b>	Faible (centrée cœur réseau)	Élevée (gestion partagée avec la RAN)

*Figure 11 : Comparaison : TAU (4G) vs RAU et RNAU (5G)*

## 12 Stratégies Complémentaires et Considérations

### 12.1 Coordination Inter-RAT / Inter-Système

- Les transitions entre technologies radio (par exemple, 4G ⇌ 5G ou même 2G/3G) nécessitent des **procédures spécifiques de TAU ou RAU**.
- Une **configuration optimisée des zones de voisinage** (TA/RA) ainsi que des politiques intelligentes de **handover** et de **reselection cellulaire** permettent :
  - D'éviter des mises à jour de localisation inutiles.
  - De garantir la **continuité de service** et une **expérience utilisateur fluide** lors des changements de réseau.

### 12.2 Impact sur la Batterie

- Chaque procédure réseau impliquant l'UE (TAU, RAU, RNAU, Paging Response, etc.) **consomme de l'énergie**.
- L'introduction de l'état **RRC\_INACTIVE** vise spécifiquement à **réduire cette consommation** :
  - En permettant à l'UE de rester **accessible** sans passer en RRC\_CONNECTED.
  - En évitant le **rétablissement complet de la connexion radio**, coûteux en énergie.

- Comparé au mode ECM-IDLE de la 4G, l'état RRC\_INACTIVE est **particulièrement avantageux** dans les scénarios de **mobilité modérée**.

L'optimisation de la gestion des Tracking Areas est passée d'une planification statique basée sur des règles et des analyses historiques à une approche de plus en plus dynamique, prédictive et contextuelle, largement facilitée par l'IA/ML. La 5G marque une étape significative avec l'introduction de l'état RRC\_INACTIVE et des RNAs, qui permettent de déporter une partie importante de la gestion de la mobilité vers la RAN, allégeant considérablement le cœur de réseau et offrant de nouvelles opportunités d'optimisation fine, notamment dans le contexte du Network Slicing. L'objectif reste constant : assurer la joignabilité des UEs tout en minimisant la signalisation superflue pour un réseau plus efficace et des terminaux plus autonomes.

# Synthèse et Conclusion.

## Synthèse des Mécanismes Fondamentaux

Au terme de cette exploration détaillée de la gestion de la localisation dans les réseaux mobiles, et plus spécifiquement du rôle central des Zones de Suivi (Tracking Areas - TA) en 4G et 5G, plusieurs constats et mécanismes fondamentaux émergent. Nous avons établi que la gestion de la localisation est une fonction essentielle, née de la nécessité de concilier la mobilité inhérente des utilisateurs avec l'impératif pour le réseau de pouvoir les joindre à tout moment, tout en préservant les ressources critiques que sont l'énergie des terminaux et la capacité de signalisation du réseau.

Notre analyse a mis en lumière les éléments suivants :

1. **L'Architecture Cellulaire comme Base** : Le découpage du territoire en cellules, chacune desservie par une station de base (BTS, NodeB, eNodeB, gNodeB), constitue la grille géographique fondamentale. Chaque station de base joue un rôle clé en diffusant non seulement l'identifiant unique de sa cellule (CGI/ECGI/NCGI) mais aussi l'identifiant de la zone de localisation de niveau supérieur (LAI ou TAI).
2. **La Hiérarchie des Zones pour l'Efficacité** : Pour éviter une surcharge liée au suivi au niveau de la cellule en mode veille, les réseaux implémentent une hiérarchie. Les cellules sont regroupées en Zones de Localisation (LA) en 2G/3G et, de manière plus moderne et unifiée pour les réseaux paquets, en **Zones de Suivi (Tracking Areas - TA)** en 4G/5G. Cette structure permet aux terminaux en mode veille de se déplacer librement à l'intérieur d'une TA (ou d'une TA List) sans notifier le réseau.
3. **Les Entités Cœur comme Orchestrateurs** : La gestion de la localisation au niveau des TA est orchestrée par des entités dédiées du cœur de réseau : le **MME** (Mobility Management Entity) en 4G/EPC et l'**AMF** (Access and Mobility Management Function) en 5G/5GC. Ces entités enregistrent la dernière TA (ou TA List) connue pour chaque terminal en mode veille, en s'appuyant sur les informations d'abonnement et l'adresse de l'entité de service stockées dans les bases de données centrales (**HSS** en 4G, **UDM** en 5G).
4. **Les Procédures Dynamiques Clés** : Deux procédures dynamiques régissent l'interaction entre le terminal et le réseau pour la localisation en mode veille :
  - **La Mise à Jour de Zone de Suivi (TAU / Registration Update)** : Initiée par le terminal lorsqu'il détecte son entrée dans une TA non couverte par sa TA List enregistrée, ou lors de l'expiration d'un timer périodique. Elle informe le MME/AMF de la nouvelle localisation approximative de l'UE.
  - **La Recherche (Paging)** : Initiée par le MME/AMF lorsqu'une communication entrante est destinée à un terminal en mode veille. Elle consiste à diffuser un message d'appel sur toutes les cellules de la dernière TA (ou TA List) enregistrée pour l'UE, afin de le "réveiller" et de l'inviter à établir une connexion.

5. **La TA List comme Outil d'Optimisation** : L'introduction de la **TA List** en 4G/5G permet au réseau d'assigner à un terminal une liste de plusieurs TAI. L'UE n'effectue une mise à jour que s'il sort de l'ensemble de la zone couverte par cette liste, réduisant ainsi significativement la fréquence des mises à jour aux frontières des TAs.

### Réponse à la Problématique Centrale

La problématique centrale de ce rapport visait à comprendre **comment les réseaux mobiles modernes (4G/5G) implémentent et optimisent la gestion de la localisation via les Zones de Suivi (TA) pour assurer la joignabilité tout en minimisant la consommation énergétique et la charge de signalisation.**

La réponse réside fondamentalement dans l'implémentation et la gestion méticuleuse du concept de **Zone de Suivi (Tracking Area)** et des mécanismes associés.

- **Implémentation** : Les réseaux définissent des regroupements de cellules (TA) identifiés par des TAI uniques, diffusés par les stations de base. Les terminaux en mode veille surveillent ces TAI et ne contactent le cœur de réseau (MME/AMF) via une procédure de TAU/Registration Update que lorsque c'est strictement nécessaire (franchissement de la frontière de la TA List, expiration du timer périodique). Le MME/AMF maintient cet état de localisation au niveau de la TA List et utilise cette information pour cibler géographiquement la procédure de Paging.
- **Optimisation intrinsèque** : Le concept même de TA est une optimisation par rapport au suivi cellulaire, établissant un **compromis fondamental**. Il réduit drastiquement les mises à jour (économie d'énergie et de signalisation) au prix d'une augmentation de la portée et de la charge du Paging.
- **Optimisation additionnelle** : L'utilisation de la **TA List** est une optimisation clé qui affine ce compromis en réduisant davantage les mises à jour inutiles aux frontières des TAs. De plus, comme évoqué dans la Partie III (dont les détails ne sont pas repris ici mais dont les conclusions sont pertinentes), les opérateurs déploient des **stratégies d'optimisation** continues :
  - ❖ Configuration soignée de la taille et des frontières des TAs en fonction de la géographie, de la densité de population et des schémas de mobilité attendus.
  - ❖ Gestion intelligente des TA Lists assignées aux utilisateurs.
  - ❖ Exploration de techniques plus avancées comme le regroupement dynamique ou l'utilisation de l'IA/ML pour adapter la configuration des TAs aux conditions réelles et prédites du réseau et de la mobilité.
  - ❖ L'architecture 5G, avec sa flexibilité accrue (SBA, Network Slicing), offre potentiellement des leviers d'optimisation encore plus fins pour la gestion de la localisation en fonction des besoins spécifiques des différents services.

En combinant la structure hiérarchique des TA, les procédures de mise à jour et de recherche, et les techniques d'optimisation, les réseaux 4G et 5G parviennent à maintenir la joignabilité des terminaux mobiles de manière efficace et économe en ressources.

### L'Importance Cruciale d'une Gestion de Localisation Efficace

La gestion de la localisation, bien que souvent invisible pour l'utilisateur final, est une fonction absolument déterminante pour la performance et la viabilité économique des réseaux mobiles. Une gestion inefficace peut entraîner :

- ❖ Une **dégradation de l'expérience utilisateur** : Délais excessifs pour recevoir des appels ou des données (si le Paging est lent ou échoue), ou épuisement rapide de la batterie du terminal (si les mises à jour sont trop fréquentes).
- ❖ Une **surcharge du réseau** : Une signalisation excessive liée aux mises à jour ou au Paging consomme de précieuses ressources radio et de traitement au niveau du cœur de réseau, réduisant la capacité disponible pour le trafic utile et augmentant les coûts opérationnels pour l'opérateur.
- ❖ Des **problèmes de passage à l'échelle** : Avec la densification des réseaux et l'explosion du nombre d'appareils connectés (notamment l'IoT), une gestion de la localisation non optimisée deviendrait rapidement un goulot d'étranglement majeur.

Inversement, une gestion de la localisation bien conçue et optimisée contribue directement à :

- ❖ Une **meilleure autonomie des terminaux**.
- ❖ Une **utilisation plus efficace du spectre radio** et des ressources du cœur de réseau.
- ❖ Une **meilleure réactivité** pour l'établissement des communications.
- ❖ Une **meilleure capacité globale** du réseau.

### Conclusion Générale

En conclusion, la gestion de la localisation via les Tracking Areas est un mécanisme sophistiqué et essentiel au cœur des réseaux mobiles 4G et 5G. Elle incarne un arbitrage technique complexe entre la nécessité de suivre les utilisateurs pour assurer leur connectivité et l'impératif de préserver les ressources limitées du réseau et des terminaux. Grâce à une architecture hiérarchique (Cellules -> TA), des procédures de mise à jour (TAU/Registration Update) et de recherche (Paging) bien définies, et des outils d'optimisation comme la TA List, les réseaux modernes parviennent à relever ce défi avec une efficacité remarquable.

La compréhension approfondie de ces mécanismes, des entités impliquées (eNodeB/gNodeB, MME/AMF, HSS/UDM) et du compromis fondamental qu'ils gèrent, est indispensable pour appréhender la performance et les limites des systèmes de communication mobile actuels. Alors que les réseaux continuent d'évoluer vers la 6G et au-delà, avec des exigences encore plus strictes en termes de latence, de fiabilité, de densité et d'efficacité énergétique, la gestion de la localisation restera sans aucun doute un domaine clé d'innovation et d'optimisation pour garantir la promesse d'une connectivité véritablement intelligente et ubiquitaire.

## Références

- [1] PBEAXELL. "Understanding what are Cellular Networks". *PBE Axell* [en ligne]. 2024 [consulté le 30 mars 2025]. Disponible à l'adresse : <https://pbeaxell.com/about/glossary/what-is-a-cellular-network>
- [2] "Cellular network". *Wikipedia* [en ligne]. 2024 [consulté le 30 mars 2025]. Disponible à l'adresse : [https://en.wikipedia.org/wiki/Cellular\\_network](https://en.wikipedia.org/wiki/Cellular_network)
- [3] "What are Location-Based Services? Definition and FAQs". *HEAVY.AI* [en ligne]. 2024 [consulté le 30 mars 2025]. Disponible à l'adresse : <https://www.heavy.ai/technical-glossary/location-based-services>
- [6] SIMBASE. "What Is Cell?". *Simbase IoT Glossary* [en ligne]. 2024 [consulté le 30 mars 2025]. Disponible à l'adresse : <https://www.simbase.com/iot-glossary-dictionary/cell>
- [10] RF OPTIMA. "Stand out as expert in 4G tracking area planning". *RF Optima* [en ligne]. 2024 [consulté le 30 mars 2025]. Disponible à l'adresse : <https://rfoptima.com/2024/03/12/stand-out-as-expert-in-4g-tracking-area-planning/>
- [13] MOBILE PACKET CORE. "MME in 4G-LTE mobile network". *Mobile Packet Core* [en ligne]. 2024 [consulté le 30 mars 2025]. Disponible à l'adresse : <https://mobilepacketcore.com/glossary/mme-in-4g-lte-mobile-network/>
- [14] MOBILE PACKET CORE. "What is PLMN, LAC, and RAC ? - GPRS Network Identifiers". *Mobile Packet Core* [en ligne]. 2024 [consulté le 30 mars 2025]. Disponible à l'adresse : <https://mobilepacketcore.com/plmn-lac-rac-gprs/>
- [15] "3G UMTS Cell, Location Area (LA), Routing Area (RA) & UTRAN Registration Area (URA)". *YouTube* [en ligne]. 2024 [consulté le 30 mars 2025]. Disponible à l'adresse : <https://www.youtube.com/watch?v=zzbwSB-9ZE0>
- [19] EMBLASOFT. "Exploring the 3GPP AMF -- Access & Mobility Management Function". *Emblasoft* [en ligne]. 2024 [consulté le 30 mars 2025]. Disponible à l'adresse : <https://emblasoft.com/blog/exploring-the-3gpp-amf-access-mobility-management-function>