

Cours : Capteurs et Mesures en Télécommunications

Cours 6 : Le Rôle du Logiciel en tant que Capteur

Durée : 1 heure 30 minutes

Prof. Abdelmalek Bouhadjera

1. Introduction et Objectifs d'Apprentissage

Dans nos cours précédents, nous avons étudié les capteurs physiques qui convertissent des grandeurs physiques en signaux électriques. Cependant, dans les systèmes de télécommunications modernes, certaines des mesures les plus précieuses ne proviennent pas de capteurs physiques, mais de logiciels capables d'interpréter des données pour déduire des quantités impossibles à mesurer directement par le matériel.

Objectifs d'apprentissage du jour :

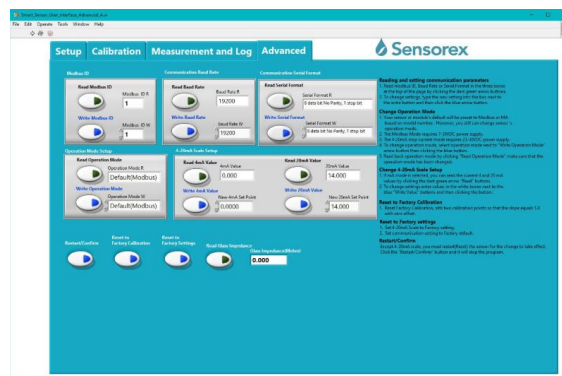
À la fin de cette séance, vous serez capables de :

- Définir ce qu'est un **capteur logiciel** et en quoi il diffère d'un capteur physique.
- Expliquer le concept de **mesure indirecte** et de **fusion de données**.
- Identifier les **capteurs logiciels courants** dans les systèmes de télécommunications.
- Comprendre les **avantages et limites** des mesures basées sur le logiciel.
- Concevoir un **capteur logiciel de base** pour un scénario donné en télécommunications.

2. Qu'est-ce qu'un Capteur Logiciel ?

a) Définition formelle

Un **capteur logiciel** (ou capteur virtuel) est un algorithme ou un programme qui **déduit la valeur d'une grandeur difficile à mesurer** en utilisant les données provenant d'autres capteurs physiques et de modèles de système, combinées grâce à des relations mathématiques et des techniques de traitement de données.

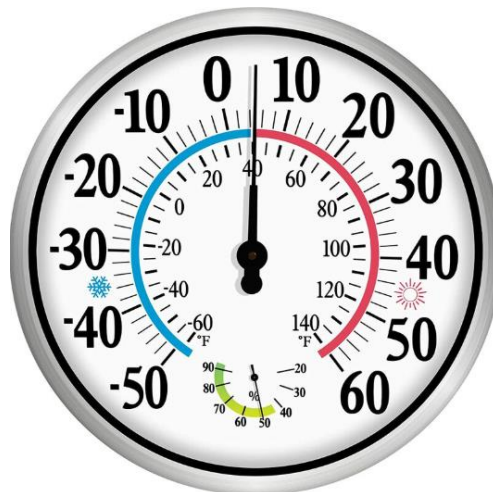


b) Différences clés entre capteurs physiques et capteurs logiciels

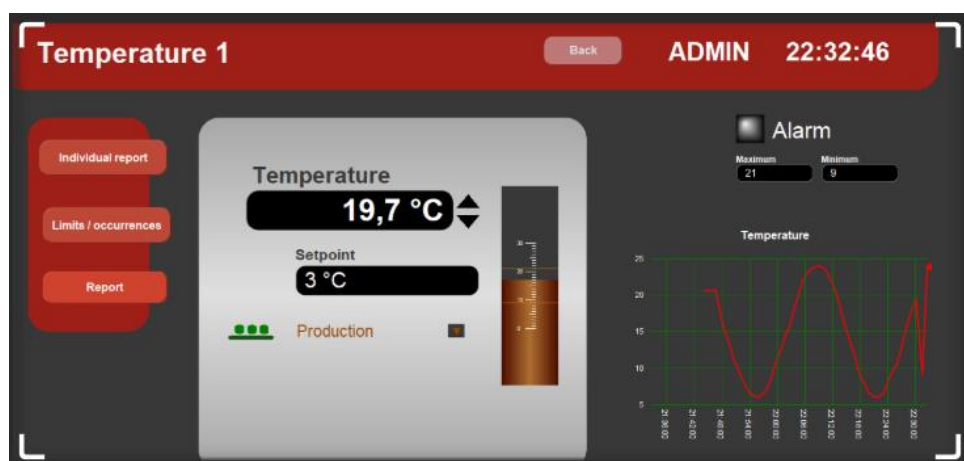
Aspect	Capteur Physique	Capteur Logiciel
Fonction principale	Transduction (conversion d'énergie)	Calcul et inférence
Entrée	Grandeur physique (température, lumière, pression)	Données provenant d'autres capteurs ou de l'état du système
Sortie	Signal électrique (tension, courant)	Valeur calculée, estimation d'état
Mise en œuvre	Composant matériel	Algorithme, code logiciel
Étalonnage	Par rapport à des normes physiques	Par rapport à des prédictions/modèles de référence

Analogie : le thermostat intelligent

- Le capteur physique est le **thermomètre** du thermostat, qui mesure directement la température de l'air.



- Le capteur logiciel est l'**algorithme** qui analyse votre emploi du temps, les prévisions météo et les habitudes d'occupation de la maison pour prédire quand vous serez présent et quelle température vous préférez. Il « perçoit » votre confort sans mesure physique directe.



3. Principes Fondamentaux de la Détection Logicielle

a) Mesure indirecte

- **Concept** : mesurer quelque chose en observant ses effets sur d'autres grandeurs mesurables.
- **Exemple** : on ne peut pas mesurer directement la congestion d'un réseau, mais on peut mesurer ses effets — latence accrue, pertes de paquets, diminution du débit.

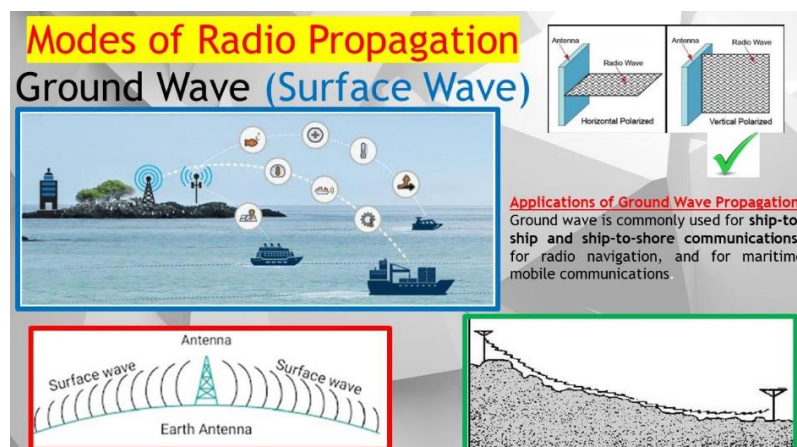
b) Fusion de données

- **Concept** : combiner plusieurs sources de données pour obtenir une information plus fiable, plus précise et plus complète qu'avec une seule source.
- **Exemple** : un système de supervision de réseau fusionne les données d'utilisation CPU des routeurs, les compteurs d'erreurs d'interfaces et les mesures de latence pour évaluer la santé du réseau.



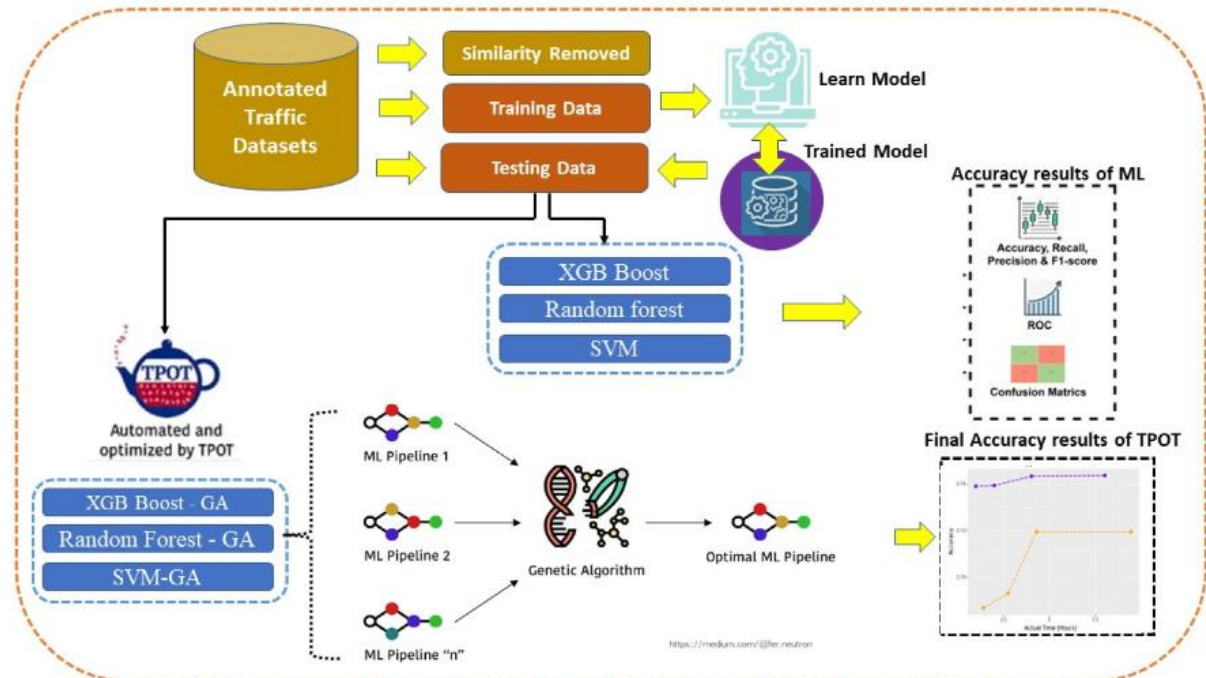
c) Estimation d'état et modélisation

- **Concept** : utiliser des modèles mathématiques du comportement du système pour estimer des états non mesurables à partir des mesures disponibles.
- **Exemple** : estimer la puissance du signal radio à un point non mesuré à l'aide d'un modèle de propagation des ondes.



d) Reconnaissance de formes et apprentissage automatique

- **Concept** : identifier des motifs dans les données pour classer des états ou prédire des comportements futurs.
- **Exemple** : utiliser des algorithmes d'apprentissage automatique pour détecter des attaques DDoS en reconnaissant des schémas de trafic inhabituels.



4. Capteurs Logiciels en Télécommunications : Exemples Détaillés

a) Capteurs de performance réseau

Capteur Logiciel	Ce qu'il « détecte »	Méthode	Données physiques utilisées
Capteur de latence	Délai réseau	Mesure du temps aller-retour (RTT) via des paquets de test (ping)	Horodatages des paquets envoyés/reçus
Capteur de perte de paquets	Fiabilité du réseau	Calcule le pourcentage de paquets non reconnus	Numéros de séquence, messages ACK
Capteur de gigue (jitter)	Stabilité du réseau	Mesure la variation du temps d'arrivée des paquets	Temps inter-arrivée des paquets
Capteur de débit (throughput)	Bande passante disponible	Calcule le taux de transfert de données sur une période	Compteurs d'octets, intervalles de temps
Capteur de QoS	Qualité perçue du service	Calcule le MOS (Mean Opinion Score) pour la VoIP	Latence, gigue, perte de paquets

Détail technique : Calcul du MOS pour la VoIP



[

$$MOS = f(R) = 1 + 0.035R + 7 \times 10^{-6} R(R-60)(100-R)$$

]
[

$$R = 94.2 - I_d - I_e - I_a$$

]

- Où :
- (I_d) = dégradation due à la latence/gigue
 - (I_e) = dégradation due au codec et à la perte de paquets
 - (I_a) = dégradation due à d'autres facteurs

Cette formule complexe « mesure » la satisfaction de l'utilisateur sans jamais lui poser la question !

b) Capteurs de sécurité réseau

Capteur Logiciel	Ce qu'il « détecte »	Méthode	Données physiques utilisées
Capteur de détection d'intrusion	Violations de sécurité	Analyse les motifs de trafic et signatures d'attaque	En-têtes de paquets, modèles de charge utile
Capteur DDoS	Attaques par déni de service	Détecte des volumes de trafic anormaux provenant de multiples sources	Statistiques de flux, adresses IP sources
Capteur d'anomalie	Menaces inconnues	Utilise le ML pour détecter des comportements déviants	Indicateurs de performance réseau multiples

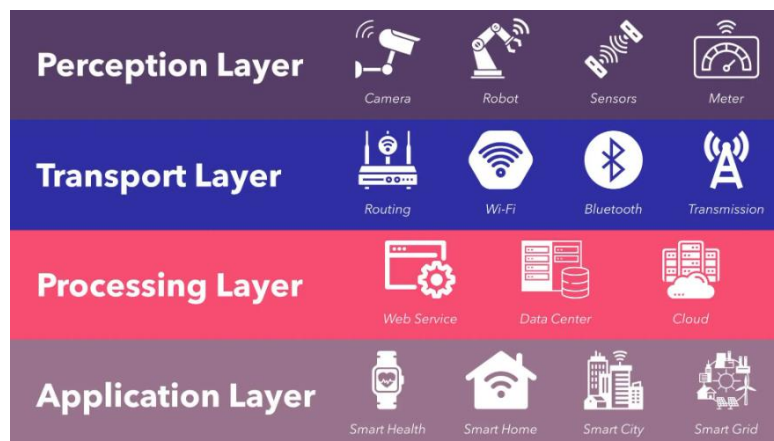
c) Capteurs de réseau radio

Capteur Logiciel	Ce qu'il « détecte »	Méthode	Données physiques utilisées
Capteur de couverture	Zones à faible signal	Combine rapports d'utilisateurs et modèles de propagation	Mesures RSRP, données de localisation
Capteur d'interférences	Dégradation de la qualité du signal	Analyse les schémas d'utilisation du spectre	Puissance RF, taux d'erreurs
Capteur de planification de capacité	Besoins futurs du réseau	Prédit la croissance du trafic et la congestion	Données d'usage historiques, évolution d'abonnés

d) Capteurs de qualité de service

Capteur Logiciel	Ce qu'il « détecte »	Méthode	Données physiques utilisées
QoE vidéo	Expérience spectateur	Mesure le ratio de mise en tampon, variations de débit	Niveau de tampon, résolutions
QoE web	Performance de navigation	Calcule le temps de chargement de page	Temps de résolution DNS, connexions TCP
QoE jeu en ligne	Expérience de jeu	Mesure le délai d'entrée et la stabilité d'image	Latence, pertes de paquets, gigue

5. Architecture de Mise en Œuvre des Capteurs Logiciels



a) Couche de collecte des données

- Rôle : collecter les données brutes des capteurs physiques et composants système
- Outils : agents SNMP, collecteurs NetFlow, captures de paquets, appels API
- Exemple : collecte de statistiques d'interface toutes les 5 minutes

b) Couche de traitement et d'analyse

- Rôle : transformer les données brutes en mesures exploitables

- Outils : analyses statistiques, modèles ML, algorithmes
- Exemple : calcul du 95^e percentile de latence à partir des horodatages

c) Couche de fusion et corrélation

- Rôle : combiner différentes sources pour obtenir des informations de plus haut niveau
- Exemple : corrélérer une utilisation CPU élevée et une augmentation de la latence

d) Couche de présentation et d'action

- Rôle : présenter les résultats et déclencher des actions automatiques
 - Outils : tableaux de bord, alertes, systèmes de contrôle automatisés
 - Exemple : alerte automatique quand le MOS descend sous 3.0
-

6. Avantages et Limitations

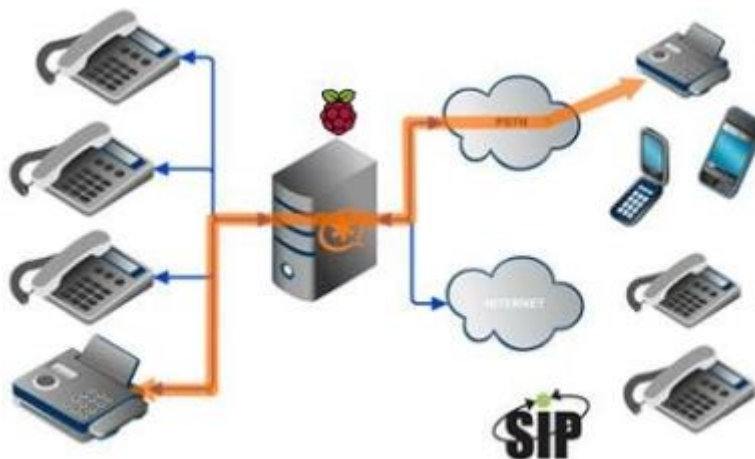
Avantages :

- Économique — pas de matériel supplémentaire requis
- Flexible — reconfigurable par logiciel
- Scalable — surveille simultanément des milliers de paramètres
- Intelligent — intègre logique complexe et apprentissage
- Non invasif — sans accès physique aux équipements
- Prédicatif — anticipe états et tendances futures

Limitations :

- Dépendance à la précision des capteurs physiques
 - Fiabilité limitée par la qualité des modèles utilisés
 - Charge de calcul importante
 - Étalonnage plus complexe
 - Propagation d'erreurs possible
 - Latence de traitement potentielle
-

7. Étude de Cas : Suivi de la Qualité VoIP de Bout en Bout



Scénario : un opérateur veut surveiller la qualité des appels VoIP sans matériel supplémentaire.

Mise en œuvre :

1. **Collecte :** paquets RTP/RTCP, CDRs, données routeur
2. **Analyse :** calcul du MOS (modèle E ITU-T G.107), gigue, pertes de paquets
3. **Fusion :** corrélation des scores MOS faibles avec la congestion réseau
4. **Présentation :** tableau de bord temps réel, alertes automatiques, rapports qualité

Résultat : l'entreprise peut désormais « percevoir » les problèmes de qualité avant que les clients ne se plaignent — uniquement via logiciel et infrastructure existante.

8. Tendances Futures des Capteurs Logiciels



- Intégration IA/ML — capteurs auto-apprenants
 - Informatique en périphérie (Edge) — traitement en temps réel
 - Applications 5G/6G — supervision du *network slicing*, IoT massif
 - Apprentissage fédéré — collaboration inter-réseaux sans partage de données brutes
 - IA explicable — transparence dans la prise de décision
-

9. Synthèse et Perspectives

Points clés :

- Les capteurs logiciels produisent des mesures par **calcul** plutôt que par **transduction physique**.
- Ils sont essentiels pour mesurer des aspects abstraits tels que l'expérience utilisateur, la sécurité et la santé du réseau.
- Leur mise en œuvre repose sur la collecte, le traitement, la fusion et l'action.
- Leur fiabilité dépend de la qualité des données et des modèles sous-jacents.

Prochain cours :

Nous explorerons les **techniques de mesure avancées** et les **nouvelles technologies de capteurs** qui façonnent l'avenir des télécommunications.

10. Questions d'Auto-Étude

1. Concevez un capteur logiciel pour détecter les problèmes de couverture Wi-Fi dans un grand immeuble de bureaux. Quelles données physiques collecteriez-vous, et quel algorithme utiliseriez-vous ?
 2. Comparez les avantages et inconvénients d'un capteur logiciel par rapport à un capteur physique pour la mesure de latence à l'échelle mondiale.
 3. Un opérateur mobile souhaite détecter les pannes potentielles d'une station de base avant qu'elles ne surviennent. Proposez une solution de capteur logiciel adaptée.
 4. Expliquez comment un capteur logiciel de détection DDoS peut utiliser les **taux de faux positifs et faux négatifs** comme indicateurs de performance, à l'instar des capteurs physiques.
-

« À l'ère du numérique, les mesures les plus précieuses ne proviennent pas toujours de ce que nous pouvons toucher, mais de ce que nous pouvons calculer. »

Would you like me to make this version **ready for slides or PDF handouts** (with titles and spacing optimized for presentation)?