

---

# Sujet : Routage efficace en énergie dans un réseau de capteurs sans fil

---

*Il est rappelé que le jury attend un exposé de 35 minutes, pédagogique et structuré, fondé sur ce sujet. Ce texte se conclut par une liste de pistes de réflexion pour guider la conception de l'exposé, mais toute initiative personnelle pertinente est appréciée. L'exposé doit contenir une ou plusieurs illustrations informatiques ainsi qu'une discussion autour d'une dimension éthique, sociétale, environnementale, économique ou juridique. Une piste particulière est proposée à cet effet.*

## 1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil sont constitués de petits capteurs, dont la taille est de l'ordre de quelques centimètres, capables de capter des informations sur leur environnement proche et de les communiquer via des technologies sans fil. Dans le cadre d'un monitoring environnemental, les capteurs peuvent par exemple mesurer la température, le taux de polluants, la pression atmosphérique, le taux d'humidité, l'index de la qualité de l'air, la concentration de pollens, le niveau sonore, etc. Les réseaux de capteurs sans fil peuvent ainsi aider à prévenir les départs d'incendies en forêt, monitorer l'état de glaciers, évaluer la biodiversité dans des zones protégées, surveiller les seuils de pollution, etc.

Des capteurs sont dispersés sur la zone géographique à monitorer afin qu'ils réalisent des mesures régulières sur le terrain et remontent les informations collectées à un point de collecte centralisé. Cette remontée d'informations depuis chaque capteur est périodique, par exemple chaque jour ou chaque semaine. La zone géographique peut être difficile d'accès (montagne, forêt, etc.). Il n'est donc pas possible de déplacer les capteurs après leur installation. On s'intéresse ici à l'énergie consommée lors du routage des informations dans un tel réseau de capteurs sans fil. Pour évaluer la qualité des algorithmes de routage, on utilise des simulations dont le but est d'évaluer les performances globales du réseau en prenant des hypothèses simplificatrices.

## 2 Modèle énergétique

Chaque capteur a les mêmes caractéristiques techniques et dispose d'une batterie qui est sa seule source d'alimentation. Chaque capteur peut communiquer avec n'importe quel autre

capteur, mais l'énergie que cette communication consomme sur sa batterie dépend de la distance entre les deux capteurs. Le point de collecte centralisée est appelé *station de base* et n'est pas contraint en énergie (i.e. il est alimenté par un réseau électrique classique). La période de remontée des informations de chaque capteur à la station de base est notée  $T$ .

Le module radio est la partie la plus gourmande en énergie de ces capteurs : l'énergie nécessaire à la captation des données environnementales est négligeable par rapport à l'énergie utilisée pour les transmettre. À chaque période  $T$ , chaque capteur doit transmettre un message de  $k$  bits. Le module radio est composé de 3 parties : un récepteur, un émetteur et un amplificateur. De manière simplifiée, on considère que la consommation énergétique d'un capteur pour transmettre un message de  $k$  bits à une distance  $d$  suit l'équation suivante :

$$E_{Tx}(k, d) = E_{elec} \times k + \epsilon_{amp} \times k \times d^2 \quad (1)$$

avec  $E_{elec}$  qui caractérise la consommation de l'émetteur et  $\epsilon_{amp}$  qui caractérise la consommation de l'amplificateur du capteur qui transmet.

On s'intéresse au routage dans un tel réseau afin que chaque capteur puisse faire remonter ses données périodiquement à la station de base en limitant sa consommation d'énergie pour faire durer sa batterie le plus longtemps possible. Dans la suite, on suppose que tous les capteurs connaissent leur position géographique (coordonnées GPS) ainsi que celle de tous les autres capteurs du réseau et de la station de base, qui connaît également la position de tous les capteurs. On considère leur positionnement en 2 dimensions (sans la hauteur) et la distance euclidienne est utilisée pour calculer  $d$  dans l'équation 1. Plusieurs protocoles de routage sont possibles. On va étudier ici ceux qui sont centralisés, c'est-à-dire entièrement pilotés par la station de base. Ainsi, au début de chaque période  $T$ , la station de base décide et informe les capteurs de : 1) la route qui sera utilisée par chaque capteur pour transmettre ses données à la station de base, 2) le moment pendant la période où chaque capteur peut transmettre des données (tour de parole entre les capteurs pour éviter toute collision de paquet et interférences entre les modules radio des capteurs). La station de base joue ainsi le rôle de chef d'orchestre entre les capteurs, ces derniers écoutant les instructions en début de chaque période. Cette étape d'initialisation n'est pas décomptée dans l'utilisation de la batterie de chaque capteur.

### 3 Routage direct

La méthode de routage la plus simple consiste à ce que chaque capteur envoie périodiquement ses informations directement à la station de base. En simulation, l'algorithme de cette méthode de routage direct est le suivant :

<b>Algorithme 1</b> : Routage direct.	
1	<b>foreach</b> période $T$ <b>do</b>
2	<b>foreach</b> capteur <b>do</b>
3	<b>if</b> le niveau de batterie du capteur le permet <b>then</b>
4	└ Transmettre le message de $k$ bits du capteur à la station de base

L'instruction de transmission du message suppose que la batterie du capteur dispose de suffisamment d'énergie pour cette opération. Cette consommation énergétique est calculée suivant

l'équation 1 avec  $d$  la distance entre le capteur et la station de base.

Cette méthode de routage directe a l'avantage d'être très simple. Cependant, elle épuise rapidement les batteries des capteurs les plus éloignés de la station de base, laissant ainsi une partie du terrain non monitorée. Pour pallier ce problème, des capteurs intermédiaires peuvent être utilisés comme relais.

## 4 Utilisation de capteurs relais

Pour un capteur, relayer un message implique d'abord de le recevoir puis de le retransmettre. La retransmission consomme autant d'énergie que la transmission simple (équation 1 avec  $d$  la distance entre les deux capteurs). La consommation énergétique de la réception suit l'équation suivante :

$$E_{Rx}(k) = E_{elec} \times k \quad (2)$$

avec  $E_{elec}$  qui caractérise la consommation du récepteur et qui est identique au paramètre de l'équation 1 qui caractérise la consommation de l'émetteur d'un capteur. On remarque que les équations 1 et 2 impliquent que les communications sont symétriques : un capteur  $n_0$  consomme autant d'énergie à transmettre  $k$  bits à un capteur  $n_1$  que ce que consomme le capteur  $n_1$  à transmettre  $k$  bits au capteur  $n_0$  et il en est de même pour la réception.

On considère que :

- $E_{elec} = 50 \text{ nJ/bit} = 50 \times 10^{-9} \text{ J/bit}$
- $\epsilon_{amp} = 100 \text{ pJ/bit/m}^2 = 100 \times 10^{-12} \text{ J/bit/m}^2$
- $k = 2000 \text{ bits}$

Prenons l'exemple d'un réseau simple composé de 2 capteurs alignés avec la station de base et dont le 2ème capteur est équidistant du 1er capteur et de la station de base, tel que sur les exemples de la figure 1. Ainsi, dans le cas de gauche, le premier capteur  $n_0$  est à 48 mètres de la station de base et le second capteur  $n_1$  à 24 mètres.



FIGURE 1 – Exemple de réseau simple avec 2 capteurs distants de 24 mètres (à gauche) ou de 22 mètres (à droite).

On peut calculer la consommation énergétique du capteur  $n_0$  pour une période donnée en utilisant le routage direct comme suit :

$$E_{direct}(n_0) = E_{Tx}(2000, 48) = 0,0005608 \text{ J}$$

Cependant, si l'on choisit d'utiliser le capteur  $n_1$  comme relais entre le capteur  $n_0$  et la station de base, la consommation totale du réseau pour cette transmission devient :

$$E_{relais}(n_0) = \underbrace{E_{Tx}(2000, 24)}_{\text{consommation de } n_0} + \underbrace{E_{Rx}(2000) + E_{Tx}(2000, 24)}_{\text{consommation de } n_1} = 0,0005304 \text{ J}$$

On a donc  $E_{direct}(n_0) > E_{relais}(n_0)$ , c'est-à-dire que la méthode directe consomme plus d'énergie que la méthode utilisant un relais pour transmettre un message du capteur  $n_0$ .

Cependant, dans le cas de l'exemple de droite de la figure 1, on a :

$$E_{direct}(n'_0) = E_{Tx}(2000, 44) = 0,0004872 \text{ J}$$

$$E_{relais}(n'_0) = E_{Tx}(2000, 22) + E_{Rx}(2000) + E_{Tx}(2000, 22) = 0,0004936 \text{ J}$$

C'est-à-dire que  $E_{direct}(n'_0) < E_{relais}(n'_0)$ . Ainsi, utiliser un relais n'est pas toujours la solution la plus avantageuse en terme de consommation énergétique globalement.

## 5 Routage MTE

On définit la méthode de routage MTE (*minimum transmission energy*) qui utilise à chaque période pour chaque capteur la route qui consomme le moins d'énergie pour atteindre la station de base en empruntant autant de capteurs relais que nécessaire. Comme pour la méthode de routage direct, on suppose que la station de base calcule préalablement toutes les routes et les diffuse à l'ensemble des capteurs. Cette étape d'initialisation n'est pas décomptée dans l'utilisation de la batterie de chaque capteur.

Afin de comparer les deux méthodes de routage précédemment décrites, on simule l'exécution de plusieurs itérations de chaque méthode. Une itération correspond à une période complète : la station de base reçoit les informations de chaque capteur actif durant cette période. On suppose que lorsque les capteurs ne sont pas en train de transmettre ou de recevoir en tant que relais, ils ne consomment pas d'énergie. L'énergie consommée par la station de base n'est pas un facteur limitant et n'est donc pas comptabilisée. Pour obtenir des résultats génériques et non spécifiques à une distribution donnée des capteurs, on utilise une répartition aléatoire sur le terrain à monitorer. La figure 2 représente une répartition aléatoire des capteurs sur le terrain qui est utilisée dans la suite pour les simulations.

On utilise les paramètres suivants :

- le terrain à monitorer est un carré de 50 mètres de côté donc de coordonnées (0,0) à (50,50) ;
- 100 capteurs sont répartis aléatoirement sur le terrain, la station de base se situe aux coordonnées (25, 150) c'est-à-dire à 100 mètres au nord du terrain ;
- à chaque itération, chaque capteur doit transmettre 2000 bits à la station de base ;
- initialement, chaque capteur dispose d'une batterie avec 0,5 J.

La figure 3 représente les résultats jusqu'à 400 itérations avec les routages direct et MTE. La partie de gauche illustre le nombre de capteurs encore actifs à chaque itération (i.e. dont le niveau de charge de la batterie permet encore de participer au réseau) et la partie de droite montre l'énergie totale restante dans le réseau, c'est-à-dire la somme de toutes les batteries.

## 6 Routage hiérarchique

Une autre méthode de routage possible consiste à diviser le terrain en plusieurs zones (ou *clusters*) avec pour chaque zone un capteur responsable des transmissions qu'on nomme chef de zone. Cette méthode de routage est nommée routage hiérarchique. Pour chaque zone, les capteurs envoient leurs données au chef de zone qui est chargé de relayer ces données à la station de base. Afin d'équilibrer l'utilisation des batteries sur l'ensemble des capteurs, les chefs de zone sont tirés aléatoirement à chaque itération. Ce tirage aléatoire est pondéré par l'énergie

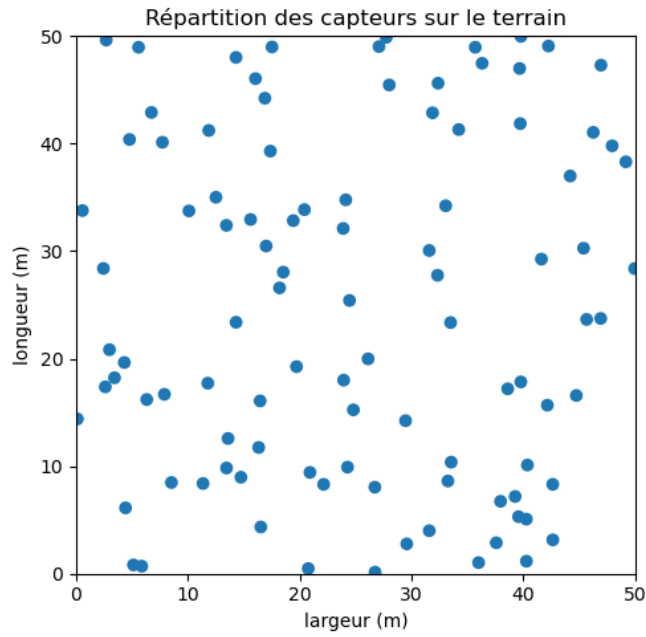


FIGURE 2 – Répartition de 100 capteurs sur un terrain de  $50 \times 50 \text{ m}^2$ , la station de base n'est pas représentée, elle est localisée aux coordonnées (25, 150).

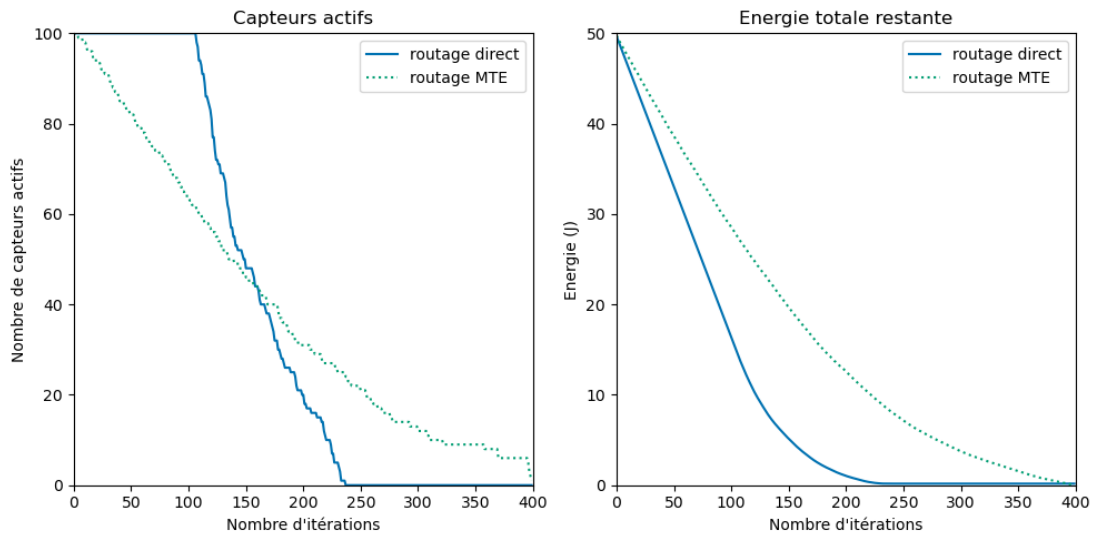


FIGURE 3 – Simulation de 400 itérations pour les routages direct et MTE.

restante dans la batterie de chaque capteur : plus la charge de la batterie d'un capteur est élevée, plus il a de chances d'être tiré au sort. Le tirage aléatoire des chefs de zones ainsi que la constitution des zones est effectué par la station de base et transmis aux capteurs. On suppose que cette transmission est négligeable pour les batteries des capteurs. Les zones sont constituées par proximité géographique : chaque capteur appartient à la zone du chef de zone dont il est le plus proche en distance.

L'algorithme de routage hiérarchique est le suivant :

<b>Algorithme 2 : Routage hiérarchique</b>	
1	<b>foreach</b> période $T$ <b>do</b>
2	Tirer aléatoirement au maximum $C$ chefs de zones parmi les capteurs encore actifs
3	<b>foreach</b> capteur qui n'est pas chef de zone <b>do</b>
4	<b>if</b> le niveau de batterie du capteur le permet <b>then</b>
5	└ Transmettre le message de $k$ bits du capteur à son chef de zone
6	<b>foreach</b> chef de zone <b>do</b>
7	<b>if</b> le niveau de batterie du capteur le permet <b>then</b>
8	└ Transmettre les messages de $k$ bits de tous les capteurs de la zone (y compris le message du chef de zone)

La figure 4 (à la fin du sujet) représente une répartition aléatoire de 10 chefs de zones (marqués par une croix) sur le terrain, les capteurs d'une même zone sont représentés par la même couleur.

## 7 Routage LEACH

Une amélioration possible de la méthode de routage hiérarchique consiste à autoriser chaque chef de zone à fusionner les données qu'il reçoit des autres capteurs, par exemple en utilisant la moyenne ou la médiane des valeurs collectées. Cette fusion de données a cependant un coût énergétique pour chaque message :

$$E_{Fusion}(k) = E_{proc} \times k \quad (3)$$

avec  $E_{proc}$  qui caractérise le coût énergétique de calcul pour un message de  $k$  bits. Dans la suite, on considère que  $E_{proc} = 5 \text{ nJ/bit}$ , cette énergie étant prélevée sur la batterie du chef de zone.

Cette méthode de routage hiérarchique avec fusion de données est nommée LEACH (*Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*). La figure 5 (à la fin du sujet) représente les résultats jusqu'à 1000 itérations avec les 4 méthodes de routage. Pour les routages hiérarchique et LEACH, on a choisi d'avoir 10 zones maximum à chaque itération, soit 10% des capteurs qui sont chefs de zones.

## Pistes de réflexion pour l'exposé

1. Discuter des points communs et des différences des méthodes proposées ici avec des protocoles de routage classiques (par exemple RIP et OSPF). Discuter des avantages et in-

convénients à utiliser des méthodes de routage centralisées.

2. Expliquer et comparer les performances des différents routages présentés ici.
3. Proposer un algorithme pour le routage MTE et détailler sa complexité.
4. Proposer une simulation du routage MTE qui renvoie à chaque itération le nombre de capteurs encore actifs et l'énergie totale restante.
5. Dans l'algorithme hiérarchique, on a choisi d'utiliser un tirage aléatoire pondéré pour déterminer les chefs de zone à chaque itération. Discuter d'autres options possibles pour choisir les chefs de zone et construire les zones et comparer leurs performances de manière expérimentale.
6. Proposer une simulation du routage LEACH et déterminer de manière expérimentale le nombre optimal de zones.
7. L'algorithme 2 correspond à l'algorithme implémenté en simulation pour évaluer les performances du routage hiérarchique. Proposer les algorithmes qui seraient effectivement exécutés sur les capteurs, sur les chefs de zone et sur la station de base pour cette méthode de routage.
8. Discuter d'algorithmes possibles pour la fusion de données dans le routage LEACH et de leur pertinence. Discuter la pertinence des algorithmes proposés en fonction du type des données et des applications considérées, afin de limiter la consommation d'énergie des capteurs.
9. Proposer des algorithmes pour effectuer le routage MTE de manière distribuée, c'est-à-dire si la station de base n'est plus chef d'orchestre mais est uniquement utilisée pour collecter les informations. Ainsi, les capteurs doivent s'auto-organiser pour communiquer avec elle.
10. Discuter les conséquences sociétales et environnementales de l'utilisation de réseaux de capteurs sans fil pour le monitoring environnemental.

## Références

- [1] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan, " *Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks*", 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2000.





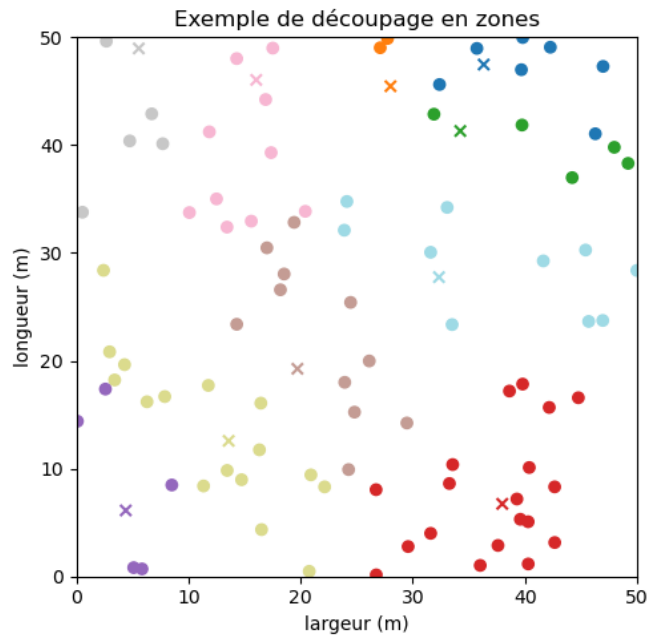


FIGURE 4 – Exemple de répartition en zones avec 10 chefs de zone.

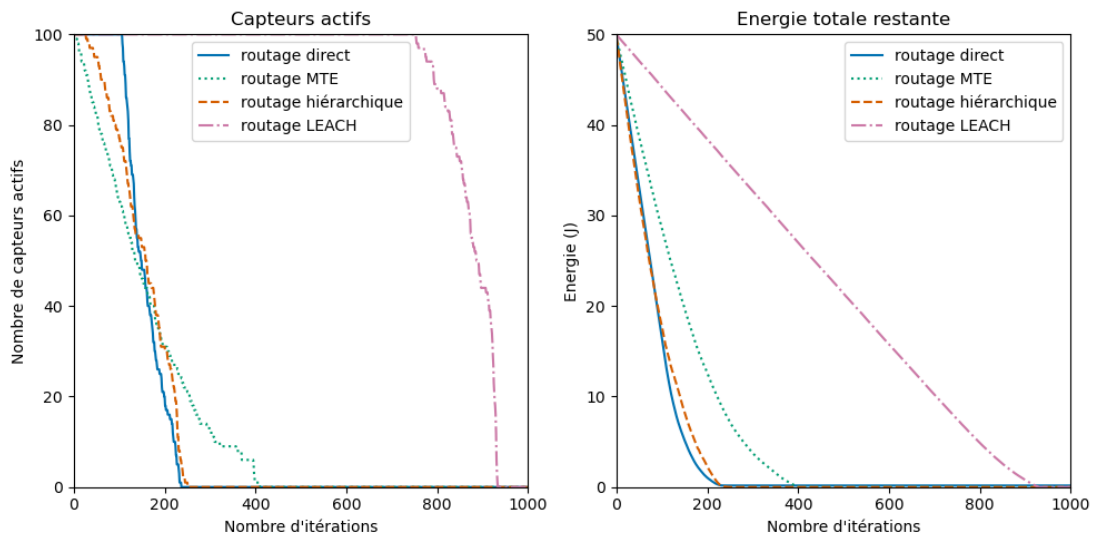


FIGURE 5 – Simulation de 1000 itérations pour les différentes méthodes de routage.