

Amélioration des performances de localisation en intérieur par optimisation du placement des balises

Soufien Kammoun*, Jean-Baptiste Pothin**, Jean-Christophe Cousin*

* Télécom ParisTech, {soufien.kammoun, jean-christophe.cousin}@telecom-paristech.fr

** DataHertz, jean-baptiste.pothin@datahertz.fr

Mots-clefs : positionnement balise, trilatération, localisation en intérieur, recuit simulé

Résumé

La précision des systèmes de localisation est affectée par la géométrie de leur infrastructure. Une démarche pour l'amélioration des performances est d'optimiser le placement des balises (appelées également dans la littérature *ancres*, *amers* et parfois *stations de bases*). Dans ce contexte, nous introduisons deux extensions du critère DOP (*Dilution Of Precision*) applicables aux mesures de puissances et adaptées aux systèmes de localisation en intérieur utilisant des signaux radiofréquences et la métrique RSS (*Received Signal Strength*). Nous proposons également un nouvel algorithme qui utilise la méta-heuristique du recuit simulé pour optimiser le placement des balises. Des résultats expérimentaux en 2D et 3D confirment l'apport de l'approche proposée.

Introduction

La trilatération est une méthode qui vise à estimer la position d'une cible en utilisant des mesures de distances relatives à un ensemble de points de référence connu. La disposition de ces "balises" affecte fortement la précision de localisation obtenue [1, 2]. L'approche intuitive consiste à utiliser un placement dense. Cette solution ne tient pas compte des problématiques d'interférences et de coût budgétaire. D'un autre côté, il est connu que la disposition optimale au sens Cramér-Rao est, en 2D, un polygone régulier centré sur la cible. En 3D, il s'agit d'un solide de Platon avec les balises aux extrémités [3, 4]. Cependant, cette "optimalité" ne tient pas compte des contraintes topologiques auquel est souvent confronté le praticien, comme par exemple l'obligation pour une balise d'être installée sur un mur, au plafond, près d'une prise électrique ou réseau, etc. Pour prendre en compte ces hypothèses, différentes stratégies d'optimisation sous contraintes ont été proposées, dont une recherche tabou, un algorithme génétique, un algorithme de colonies de fourmis [5, 6, 7]. Le critère d'optimisation pour ces méthodes est souvent basé sur le concept de *dilution de précision* (DOP), introduit historiquement pour des mesures sur le temps de vol TOA/TDOA [8] et étendu depuis aux mesures d'angles d'arrivées AOA [9]. Dans [10], les auteurs proposent une extension de DOP pour des mesures de puissance RSS dans le cas particulier à deux dimensions et dit *régulier* (avec un bruit de mesures qui suit une loi normale de même écarts types pour toutes les balises). Nous proposons ici une nouvelle formulation pour le cas général irrégulier, 2D et 3D avec écarts types distincts. Nous introduisons également une version pondérée de cette extension, qui permet d'exhiber de meilleures performances encore. Enfin, nous proposons d'appliquer au problème d'optimisation du placement des balises la technique du *recuit simulé*, rapide et simple à implémenter.

Cet article est organisé comme suit. La première section rappelle les principes de la localisation par trilatération. La section 2 présentera le concept DOP et notre extension aux mesures de puissance. Notre algorithme d'optimisation sera décrit section 3, suivi de résultats expérimentaux section 4.

1 Principes de localisation par trilatération

Nous rappelons dans cette section les principes de la localisation par trilatération.

Le but de la trilatération est de déterminer la position d'un point étant donné un ensemble de points connus et leurs distances. Le problème peut être défini en 3D comme suit : soit $\mathbf{x} \triangleq (x, y, z)^T$ la position de la cible à déterminer et $\mathbf{x}_i \triangleq (x_i, y_i, z_i)^T$ la position de la balise i , avec $\mathbf{x} \neq \mathbf{x}_i$ et $\mathbf{x}_i \neq \mathbf{x}_j$ pour tout $i \neq j$, $i, j = 1, \dots, n$. L'objectif est de trouver l'intersection des sphères de rayons $r_i \triangleq \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|$ et centrés sur les différentes balises, c-à-d trouver la solution de

$$\{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 = r_i^2, \quad i = 1, \dots, n\}. \quad (1)$$

Pour résoudre ce système, une approche courante consiste à soustraire une équation des autres de manière à supprimer les termes quadratiques. On obtient un système linéaire à $(n - 1)$ équations, de forme $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$, avec [11]

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} (\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2)^T \\ \vdots \\ (\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_n)^T \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \mathbf{b} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \|\mathbf{x}_1\|^2 - \|\mathbf{x}_2\|^2 + r_2^2 - r_1^2 \\ \vdots \\ \|\mathbf{x}_1\|^2 - \|\mathbf{x}_n\|^2 + r_n^2 - r_1^2 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Considérer maintenant la minimisation de $\|\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{b}\|^2$ par rapport à \mathbf{x} conduit au problème bien connu de régression par moindres carrés. En supposant $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ non-singulière et bien conditionnée, la solution s'écrit analytiquement :

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}. \quad (3)$$

Le calcul de (3) nécessite de connaître les distances r_i . Les systèmes dits *range-based* estiment souvent celles-ci à partir de mesures de puissance RSS (Received Signal Strength) et d'un modèle de propagation. Le modèle le plus utilisé en milieux indoor s'écrit [12] :

$$P_i(d) = P_i(d_0) - 10\alpha_i \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right), \quad (4)$$

où $P_i(d)$ (en dBm) est la valeur RSS à la distance d , d_0 une distance de référence et α_i le coefficient de propagation pour la balise i . En pratique, les mesures de puissance, que nous noterons $\hat{P}_i(d)$, sont corrompues. Dans le cas d'un bruit additif :

$$\hat{P}_i(d) = P_i(d) + X_{\sigma_i}, \quad (5)$$

avec X_{σ_i} une variable aléatoire, considérée en général log-normale de moyenne nulle et d'écart type σ_i . Les paramètres $P_i(d_0)$ et α_i peuvent être obtenues par régression en utilisant la méthode des moindres carrés linéaires [10]. Enfin, étant donné d_0 , $P_i(d_0)$, α_i et un seul échantillon RSS disponible, l'estimateur au Maximum de Vraisemblance pour r_i est [13] :

$$\hat{r}_i = d_0 10^{\frac{P_i(d_0) - \hat{P}_i(d)}{10\alpha_i}}. \quad (6)$$

2 Critères géométriques pour l'optimisation du placement des balises

Initialement proposé pour le système GPS, le concept DOP (*Dilution of Precision*) permet d'évaluer la précision obtenue en localisation pour une configuration donnée de satellites. L'idée générale est de *prédire* l'effet qu'une erreur de mesures engendre sur l'erreur de positionnement.

2.1 DOP pour des systèmes exploitant le TOA/TDOA

Pour des systèmes basés sur des mesures de temps de vol, le critère DOP peut se décomposer en différents indicateurs, PDOP (*Positional DOP*), HDOP (*Horizontal DOP*), VDOP (*Vertical DOP*) et TDOP (*Time DOP*). Pour la suite, nous considérerons PDOP qui traduit l'influence des satellites sur la qualité du positionnement. En supposant que les erreurs de mesures sont indépendantes et identiquement distribuées (i.i.d.), de variance σ^2 , cet indicateur s'écrit [14] :

$$PDOP = \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2)}/\sigma, \quad (7)$$

où les termes de dilution $\sigma_{(x,y,z)}^2$ se trouvent sur la diagonale principale de la matrice inverse $\mathbf{Q}^T \mathbf{Q}$ définie pour $n \geq 4$ par :

$$(\mathbf{Q}^T \mathbf{Q})^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy}^2 & \sigma_{xz}^2 & \sigma_{xt}^2 \\ \sigma_{xy}^2 & \sigma_y^2 & \sigma_{yz}^2 & \sigma_{yt}^2 \\ \sigma_{xz}^2 & \sigma_{yz}^2 & \sigma_z^2 & \sigma_{zt}^2 \\ \sigma_{xt}^2 & \sigma_{yt}^2 & \sigma_{zt}^2 & \sigma_t^2 \end{bmatrix} \quad \text{avec} \quad \mathbf{Q} \triangleq \begin{bmatrix} \frac{x_1-x}{r_1} & \frac{y_1-y}{r_1} & \frac{z_1-z}{r_1} & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_n-x}{r_n} & \frac{y_n-y}{r_n} & \frac{z_n-z}{r_n} & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(\mathbf{x}_1-\mathbf{x})^T}{r_1} & -1 \\ \vdots & \vdots \\ \frac{(\mathbf{x}_n-\mathbf{x})^T}{r_n} & -1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

2.2 DOP pour des systèmes exploitant le RSS

Nous proposons dans cette section une formulation du critère DOP adaptée aux systèmes qui utilisent des mesures RSS. Nous appliquons pour cela l'approche générale présentée dans [15]. Soit \hat{P}_i l'approximation par série de Taylor à l'ordre 1 de la valeur mesurée (5)

$$\hat{P}_i \triangleq P_i + \frac{\partial P_i(x, y, z)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial P_i(x, y, z)}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial P_i(x, y, z)}{\partial z} \Delta z \quad (9)$$

$$= P_i + \frac{10\alpha_i}{\ln(10)} \left(\frac{(x_i - x)\Delta x + (y_i - y)\Delta y + (z_i - z)\Delta z}{r_i^2} \right), \quad (10)$$

pour $i = 1, \dots, n$, que l'on peut mettre sous la forme matricielle suivante :

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \hat{P}_1 - P_1 \\ \vdots \\ \hat{P}_n - P_n \end{pmatrix}}_{\Delta \mathbf{P}} = \frac{10}{\ln(10)} \underbrace{\begin{bmatrix} \alpha_1 & & \mathbf{0} \\ & \ddots & \\ \mathbf{0} & & \alpha_n \end{bmatrix}}_{\mathbf{H}} \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{(\mathbf{x}_1-\mathbf{x})^T}{r_1^2} \\ \vdots \\ \frac{(\mathbf{x}_n-\mathbf{x})^T}{r_n^2} \end{pmatrix}}_{\Delta \mathbf{u}} \underbrace{\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix}}_{\Delta \mathbf{u}}. \quad (11)$$

En supposant $\mathbf{H}^T \mathbf{H}$ inversible, on trouve pour solution par résolution des moindres carrés :

$$\Delta \mathbf{u} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \Delta \mathbf{P}. \quad (12)$$

Cette équation montre la relation entre les erreurs de mesures ($\Delta \mathbf{P}$) et les erreurs de positionnement ($\Delta \mathbf{u}$). Le vecteur de résidus $\Delta \mathbf{P}$ contient les valeurs de bruit X_{σ_i} . Sous hypothèses de bruits gaussiens, i.i.d., à moyenne nulle et d'écart type σ_i , la matrice de covariance est la matrice diagonale Σ

$$\Sigma = \text{cov}(\Delta \mathbf{P}) = \left(\text{cov}(\Delta P_i, \Delta P_j) \right)_{i,j} = \begin{cases} \sigma_i^2 & \text{pour } i = j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (13)$$

où $\text{cov}(\cdot)$ représentent l'opérateur covariance. En utilisant maintenant la propriété $\text{cov}(\mathbf{Y} \mathbf{X}) = \mathbf{Y} \text{cov}(\mathbf{X}) \mathbf{Y}^T$ pour \mathbf{Y} une matrice $q \times p$ et \mathbf{X} un vecteur aléatoire $p \times 1$, la matrice de covariance pour l'erreur de positionnement est

$$\text{cov}(\Delta \mathbf{u}) = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \Sigma \mathbf{H} (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy}^2 & \sigma_{xz}^2 \\ \sigma_{xy}^2 & \sigma_y^2 & \sigma_{yz}^2 \\ \sigma_{xz}^2 & \sigma_{yz}^2 & \sigma_z^2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Par analogie avec PDOP (équation (7)), nous appelons EPDOP (*Enhanced PDOP*) l'indicateur obtenu en prenant la racine carrée de la somme des termes de dilution se trouvant sur la diagonale principale de la matrice (14). Plus formellement :

$$EPDOP = \sqrt{\text{Tr}((\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \Sigma \mathbf{H} (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1})} \quad (15)$$

où $\text{Tr}(\cdot)$ représente l'opérateur trace d'une matrice. Notons que dans le cas particulier où la variance des mesures est considérée identique pour toutes les balises, de valeur σ^2 , on a $\Sigma = \sigma^2 \mathbf{I}$ qui conduit au résultat particulier [10] $EPDOP = \sigma \sqrt{\text{Tr}((\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1})}$.

L'équation (15) est obtenue sous l'hypothèse d'une erreur de modélisation faible, ayant la même influence pour toutes les distances et permettant de négliger l'erreur d'approximation faite dans (9). Pour pallier à ces inconvénients, nous proposons d'attribuer plus de poids aux positions loin des balises grâce à la version pondérée (Weighted EPDOP) suivante :

$$WEPDOP = \left(\min_{i=1, \dots, n} \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| \right) \times EPDOP. \quad (16)$$

3 Optimisation du placement de balises par recuit simulé

Le recuit simulé est un algorithme stochastique proposé par [16] dont le principe de base consiste à explorer l'espace des solutions avec une amplitude (appelée également température) qui décroît au cours des itérations et en acceptant les solutions qui dégradent une certaine fonction objectif selon une règle probabiliste. Pour appliquer cette méthodologie au problème d'optimisation du placement des balises, notons \mathcal{B}_i l'ensemble des positions admissibles pour la balise i parmi n et \mathcal{M} un ensemble fini de positions admissibles pour la cible tels que $\mathcal{B}_{i=1 \dots n} \subseteq \mathcal{V}$ et $\mathcal{M} \subset \mathcal{V}$ avec \mathcal{V} un volume en investigation. \mathcal{V} représente par exemple une pièce d'un bâtiment, \mathcal{B}_i ses murs et \mathcal{M} des points échantillonnés dans un plan horizontal où évolue le mobile. L'objectif est de minimiser, par rapport à un ensemble de n balises noté Ω , une fonction de la forme

$$f(\Omega) = \frac{1}{|\mathcal{M}|} \sum_{\mathbf{x} \in \mathcal{M}} g(\Omega, \mathbf{x}), \quad (17)$$

où $|\cdot|$ représente la fonction cardinal, sous la contrainte

$$\Omega = \{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n : \mathbf{x}_i \in \mathcal{B}_i\}. \quad (18)$$

La fonction g peut représenter le critère de dilution PDOP, EPDOP ou WEPDOP. Pour la partie expérimentale, nous appellerons également PDOP' l'indicateur obtenu en multipliant PDOP éqn. (7) par le même terme de pondération que celui introduit dans WEPDOP. Par simplicité, une zone \mathcal{B}_i est modélisée sous la forme d'un cube caractérisé par les plages admissibles $[x_{\min}(i), x_{\max}(i)]$, $[y_{\min}(i), y_{\max}(i)]$ et $[z_{\min}(i), z_{\max}(i)]$ des coordonnées pour la balise i .

Etant donné une solution initiale Ω , l'algorithme BPSA (*Beacon Placement using Simulated Annealing*) procède comme décrit ci-après table 1.

- (1) Initialiser $r = r_0$, $f_{min} = f(\Omega)$, $\Omega^* = \Omega$ et $k = 0$.
- (2) Incrémenter k
- (3) Choisir aléatoirement un entier $i \in \{1, \dots, n\}$ et remplacer x_i dans Ω par

$$x_i \leftarrow \lfloor x_i + r\delta x \rfloor, \tag{19}$$

où δx représente un vecteur unitaire aléatoire et $\lfloor \cdot \rfloor$ un opérateur qui transforme un vecteur $x \in \mathbb{R}^3$ en un vecteur réalisable $x \in \mathcal{B}_i$.

- (4) Si $f(\Omega) < f_{min}$
Faire $f_{min} \leftarrow f(\Omega)$, $\Omega^* = \Omega$ et réinitialiser $k = 0$
Sinon
Annuler le remplacement de x_i dans Ω avec une probabilité $1 - \exp\left(-\frac{(f(\Omega)-f_{min})}{r}\right)$
- (5) Retourner en (2) tant que $k < k_{max}$
- (6) Réinitialiser $k = 0$ et faire $r \leftarrow \rho r$. Retourner en (2) tant que le rayon r est supérieur à un seuil ϵ
- (7) Sortir Ω^*

Table 1 – Algorithme BPSA pour l'optimisation du placement de balises par recuit simulé

Cet algorithme utilise, étape (4), la règle d'acceptation bien connue de Métropolis [17] avec, étape (6), une loi de décroissance géométrique sur r pour simuler l'évolution du système vers son équilibre thermodynamique. Le paramètre $0 < \rho < 1$ contrôle la décroissance du rayon d'exploration et $\epsilon > 0$ le critère d'arrêt. La prise en compte de contraintes topologiques est réalisée étape 3 à l'aide de l'opérateur $\lfloor \cdot \rfloor$. Pour notre partie expérimentale, cet opérateur réalise une troncature des coordonnées des balises. Des opérateurs plus sophistiqués peuvent être mis en œuvre, comme une projection dans \mathcal{B} selon un critère de distance euclidienne minimale par exemple.

4 Résultats expérimentaux

Nous présentons dans cette section quelques résultats expérimentaux dans le cas simple symétrique obtenu pour $\alpha_i = \alpha$. L'écart type des mesures RSS est choisit tel que $\sigma_i = \sigma = 2$ dB pour pouvoir comparer entre eux les résultats des différents critères présentés à la section 2. Les autres paramètres sont fixés à $r_0 = 5$ m, $k_{max} = 20$, $\rho = 0.8$ et $\epsilon = 0.01$. L'erreur moyenne empirique de positionnement, RMS, est défini pour N réalisations par :

$$RMS(\Omega_C) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|x - \hat{x}_i\|^2}, \tag{20}$$

avec \hat{x}_i l'estimation de position obtenue par trilatération à partir de mesures RSS corrompues par X_σ (voir section 1), x une cible (supposée ici connue), et Ω_C la configuration des balises trouvée par BPSA sous critère C .

4.1 Exemple 1 - 2D avec 3 balises

Considérons dans un premier temps l'exemple à 3 balises dans une pièce de volume $\mathcal{V} = [-10, 10] \times [-10, 10] \times [0, 3]$ (m x m x m). Les balises sont à placer sur un même plan $(\mathcal{B}_i)_{i=1,2,3} = \mathcal{B} = [-10, 10] \times [-10, 10] \times [1, 1]$, où la hauteur $z = 1$ m correspond à la hauteur typique d'un dispositif de localisation porté à la ceinture. \mathcal{M} correspond au plan \mathcal{B} échantillonné uniformément au pas de 0.1. La fig. 1 montre l'évolution de la fonction f (voir équation (17)) dans le cas PDOP pour cinq solutions initiales Ω choisies aléatoirement. Pour ces différents points de départ, l'algorithme BPSA proposé converge rapidement vers une même valeur.

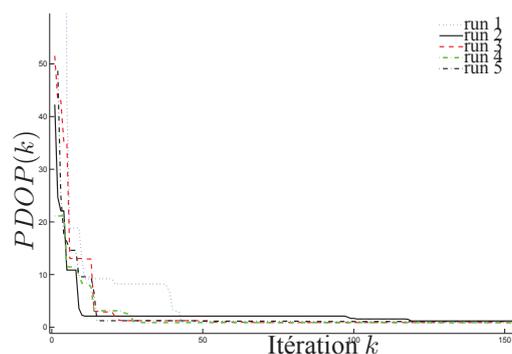


Figure 1 – Évolution du critère PDOP pour cinq placements initiaux choisis aléatoirement

La fig. 2 montre une solution trouvée par BPSA sous critère PDOP (a) et WEPDOP (b). Celles-ci forment, comme attendu, un triangle proche du triangle équilatérale optimal [3]. Dans le cas PDOP, il tend à atteindre les bords du plan alors que, pour WEPDOP, celui-ci est "contenu" à l'intérieur. Nous conjecturons que cette différence est bénéfique dans la mesure où placer les balises à l'intérieur du plan favorise les mesures RSS en réduisant en moyenne les distances du mobile aux balises.

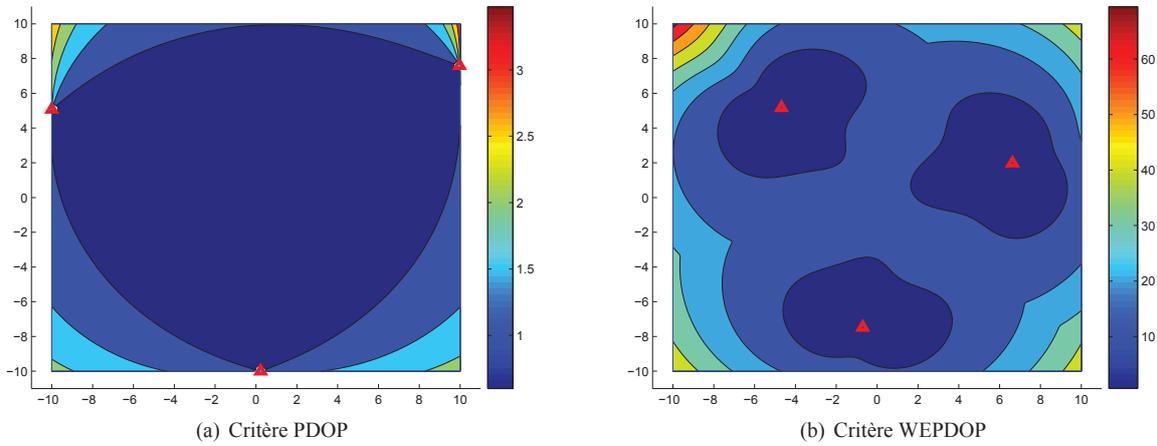


Figure 2 – Représentation des solutions trouvées par BPSA pour l'exemple 1 en 2D avec 3 balises
Les balises sont représentées par des triangles rouges

La table 2, obtenues pour $N = 100$ et la cible \mathbf{x} placée à l'origine, permet de comparer les performances. On note ici que les performances de la localisation sont améliorées d'environ 25% pour EPDOP et 50% pour WEPDOP, comparativement à PDOP. Le critère PDOP' fournit quant à lui les moins bons résultats.

$RMS(\Omega_{PDOP})$	3.92 m
$RMS(\Omega_{PDOP'})$	4.34 m
$RMS(\Omega_{EPDOP})$	2.65 m
$RMS(\Omega_{WEPDOP})$	2.25 m

Table 2 – Comparaison de l'erreur moyenne empirique de positionnement

4.2 Exemple 2 - 3D avec 4 balises

Dans ce deuxième scénario, les balises sont installées sur un plafond à une hauteur de 3 m, $(\mathcal{B}_i)_{i=1,2,3,4} = \mathcal{B} = [-10, 10] \times [-10, 10] \times [3, 3]$. La fig. 3 montre que les solutions trouvées par PDOP et WEPDOP. La table 3 considère différentes valeurs σ et des statistiques obtenues en prenant la moyenne empirique du critère RMS avec 1000 cibles choisies aléatoirement. Pour une valeur de σ , on constate les mêmes tendances que pour le scénario 1, c-à-d des performances en localisation croissantes selon l'ordre PDOP', PDOP, EPDOP et WEPDOP. On trouve également une réduction de l'erreur de 10% environ pour WEPDOP comparativement à PDOP.

	Ecart type des mesures RSS (σ)															
	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	2.25	2.5	2.75	3	3.25	3.5	3.75	4
Ω_{PDOP}	2.98	3.34	3.79	4.13	4.59	5.21	5.68	6.08	6.65	7.20	7.69	8.30	8.88	9.49	9.93	10.76
$\Omega_{PDOP'}$	3.01	3.49	3.95	4.36	4.80	5.35	6.00	6.21	6.88	7.43	7.81	8.44	8.97	9.66	10.09	10.79
Ω_{EPDOP}	2.89	3.22	3.60	4.04	4.49	5.00	5.38	5.90	6.48	6.98	7.60	8.06	8.66	9.25	9.81	10.66
Ω_{WEPDOP}	2.88	3.11	3.39	3.59	4.22	4.73	5.11	5.53	6.06	6.49	7.04	7.49	7.98	8.74	9.04	9.65

Table 3 – Comparaison des valeurs moyennes RMS pour différentes solutions Ω_C
Les meilleurs résultats sont indiqués en gras

5 Conclusions

Le placement des balises est un facteur critique qui détermine la précision des systèmes de localisation. Nous avons présenté dans cet article une méthodologie pour l'optimisation du placement des balises applicable au cas général à 3 dimensions, avec contraintes topologiques. L'idée de base est de mesurer l'influence de la position des balises par un critère de dilution

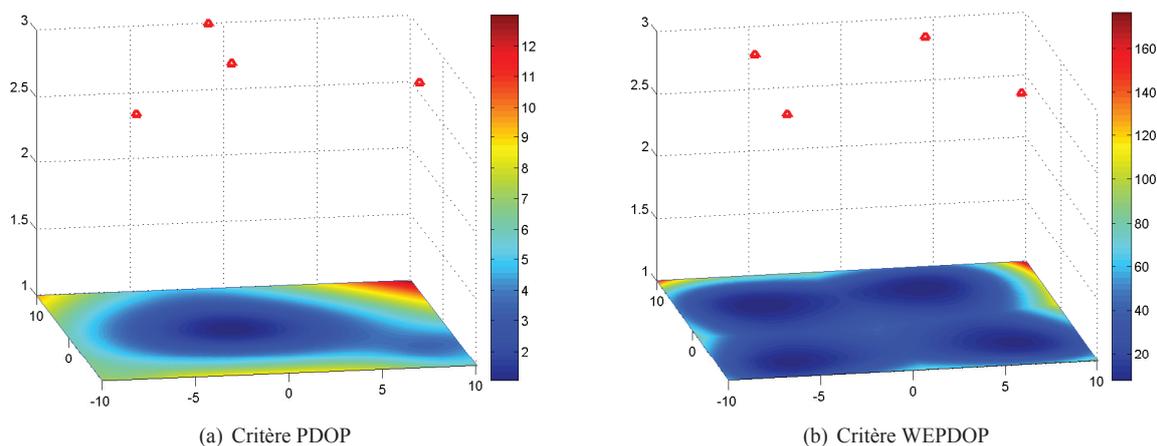


Figure 3 – Représentation des solutions trouvées par BPSA pour l'exemple 2 en 3D avec 4 balises
Les balises sont représentées par des triangles rouges

des mesures et optimiser le placement des balises. Nous avons introduit le critère EPDOP, adaptée aux mesures RSS, ainsi qu'une extension pondérée WEPDOP. L'algorithme d'optimisation proposé emploie la technique du recuit simulé. Des simulations montrent de meilleures performances pour le placement de balises par WEPDOP qu'avec le critère plus connu PDOP.

Références

- [1] R. Zemek, M. Takashima, S. Hara, K. Yanagihara, K. Fukui, S. Fukunaga, and K. Kitayama, "An Effect of Anchor Nodes Placement on a Target Location Estimation Performance," *Conference TENCON 2006*, pp. 1--4, November 2006.
- [2] K. Piowawarczyk, P. Korbel, and T. Kacprzak, "Analysis of the influence of radio beacon placement on the accuracy of indoor positioning system," in *Federated Conference on Computer Science and Information Systems*, 2013, pp. 889--894.
- [3] A. N. Bishop, B. Fidan, B. D. O. Anderson, K. Dogancay, and P. N. Pathirana, "Optimality analysis of sensor-target localization geometries," *Automatica*, vol. 46, p. 479--492, 2010.
- [4] S. Zhao, B. M. Chen, and T. H. Lee, "Optimal Sensor Placement for Target Localization and Tracking in 2D and 3D," *International Journal of Control*, vol. 86, no. 10, pp. 1687--1704, 2012.
- [5] J. O. Roa, A. R. Jiménez, F. Seco, J. C. Prieto, and J. Ealo, "Optimal placement of sensors for trilateration : Regular lattices vs meta-heuristic solutions," in *Computer Aided Systems Theory – EUROCAST 2007*, 2007, pp. 780--787.
- [6] C.-H. Wu and Y.-W. Ho, "Genetic programming for the approximation of GPS GDOP," *International Conference on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC)*, pp. 2944--2949, 2010.
- [7] M. R. Mosavi, "An Effective Method for GPS GDOP Clustering Using Ant Colony Optimization Algorithm," *Asian Journal of Geoinformatics*, vol. 10, no. 4, pp. 3--9, 2010.
- [8] H. B. Lee, "A novel procedure for assessing the accuracy of hyperbolic multilateration systems," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, pp. 2--15, 1975.
- [9] A. G. Dempster, "Dilution Of Precision in Angle-Of-Arrival Positioning Systems," *Electronics Letters*, vol. 42, pp. 291--292, 2006.
- [10] Y. Chen and H. Kobayashi, "Signal Strength based Indoor Geolocation," *IEEE International Conference on Communications, ICC 2002.*, vol. 1, pp. 436--439, April 2002.
- [11] W. S. Murphy and W. Hereman, "Determination of a position in three dimensions using trilateration and approximate distances," Colorado School of Mines, Golden, CO, Tech. Rep. MCS-95-07, 1995.
- [12] A. J. Motley and J. M. P. Keenan, "Personal communication radio coverage in buildings at 900MHz and 1700MHz," *Electronics Letters*, vol. 24, no. 12, pp. 763--764, 1988.
- [13] S. Mazuelas, A. Bahillo, R. M. Lorenzo, P. Fernandez, F. A. Lago, E. Garcia, J. Blas, and E. J. Abril, "Robust indoor positioning provided by real-time RSSI values in unmodified WLAN networks," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 3, no. 5, pp. 821--931, 2009.
- [14] R. Yarlagadda, I. Ali, N. Al-Dhahir, and J. Hershey, "GPS GDOP metric," *Radar, Sonar and Navigation, IEE Proceedings*, vol. 147, pp. 259--264, 2000.
- [15] Y. Jiang, Q. Hu, and D. Yang, "Analysis of Positioning Error for Two-dimensional Location System," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2013, pp. 1--8, 2013.
- [16] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing," *Science*, vol. 220, no. 4598, pp. 671--680, 1983.
- [17] N. Metropolis, A. Rosenbluth, M. Teller, and A. T. Teller, "Equation of state calculations by fast computing machines," *The Journal of Chemical Physics*, vol. 21, no. 6, pp. 1087--1090, 1953.