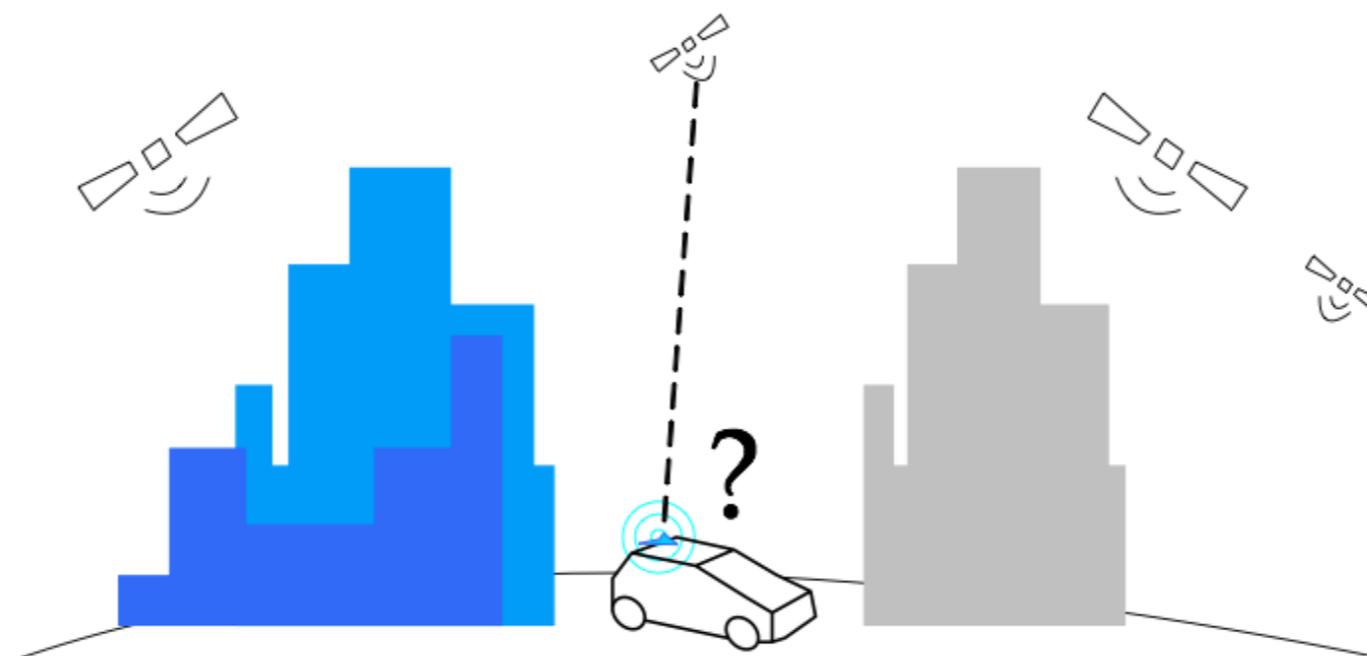


On the use of GPS and 3D Road Surface Maps for the Navigation of Road Vehicles in Urban Environments



Philippe Bonnifait

**Heudiasyc UMR6599 CNRS
Université de Technologie de Compiègne**

Présentation basée sur la thèse de

Vincent Drevelle

Étude de méthodes ensemblistes robustes pour une localisation intégrée.
Application à la navigation en milieu urbain.

Soutenue publiquement le 1^{er} décembre 2011



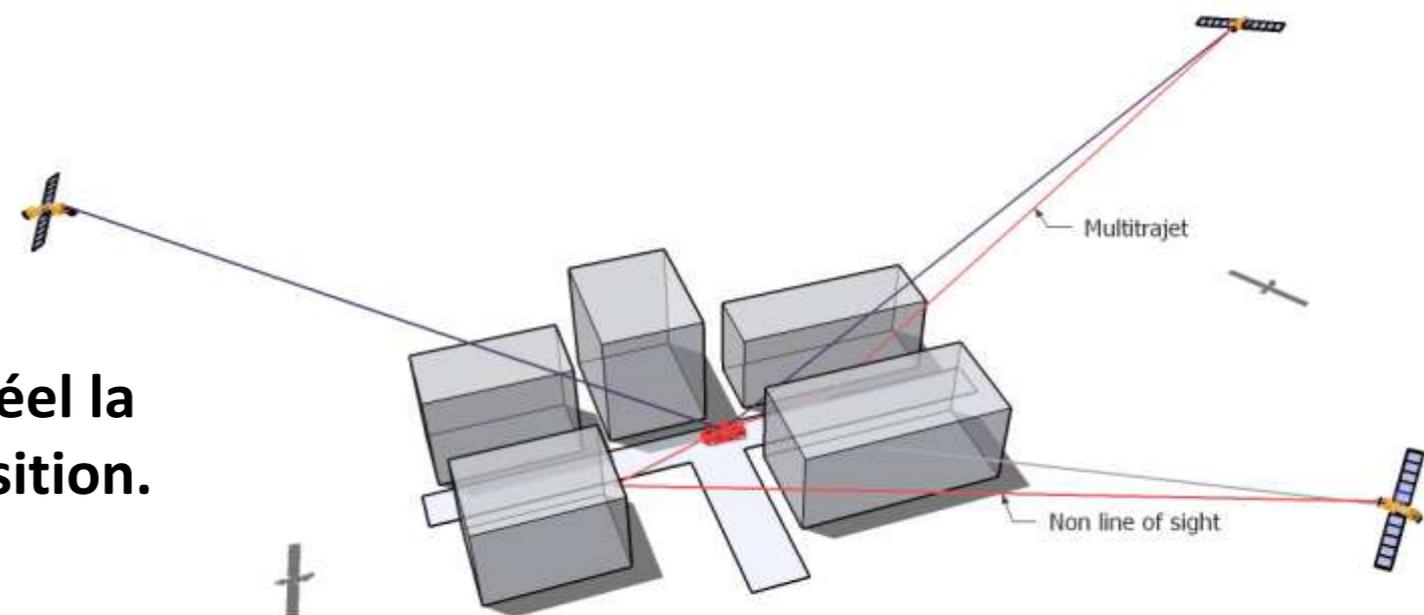
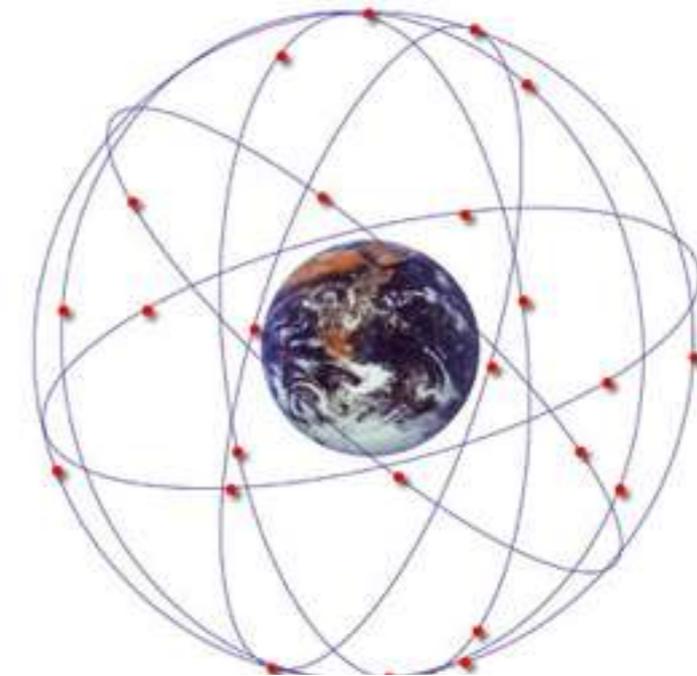
Incertitude de localisation

Un système de localisation met en œuvre des mesures extéroceptives sur des amers.

On conçoit un système (couverture, géométrie, signaux, nombre d'amers...) en fonction d'objectifs de qualité de service.

En environnement complexe, la visibilité des amers et la qualité des mesures peuvent être fortement dégradées.

L'utilisateur doit donc estimer en temps réel la confiance à accorder à l'estimation de position.

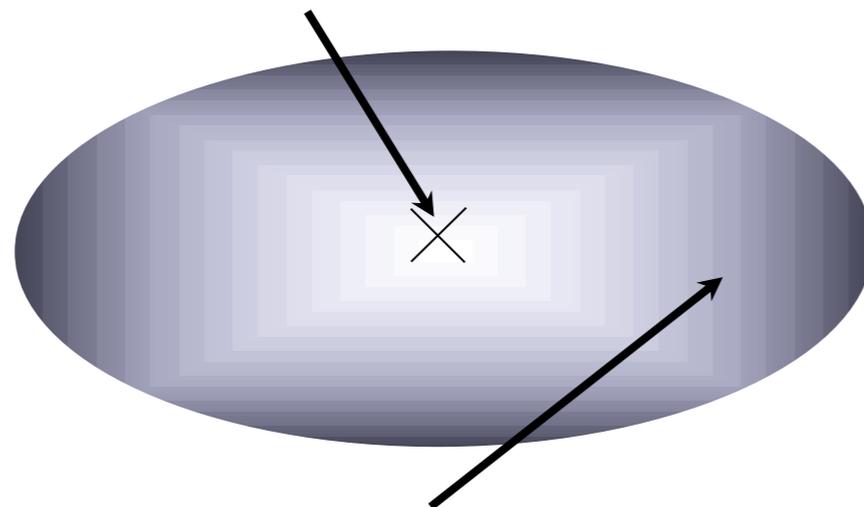


Confiance

En localisation métrique, la méthode habituelle est de déterminer une domaine de confiance

Ellipsoïdes d'incertitude

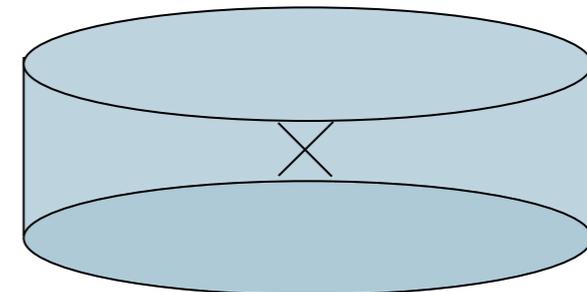
Vous êtes probablement ici...



...et moins probablement ici

Niveaux de protection

Vous êtes dans cette boîte



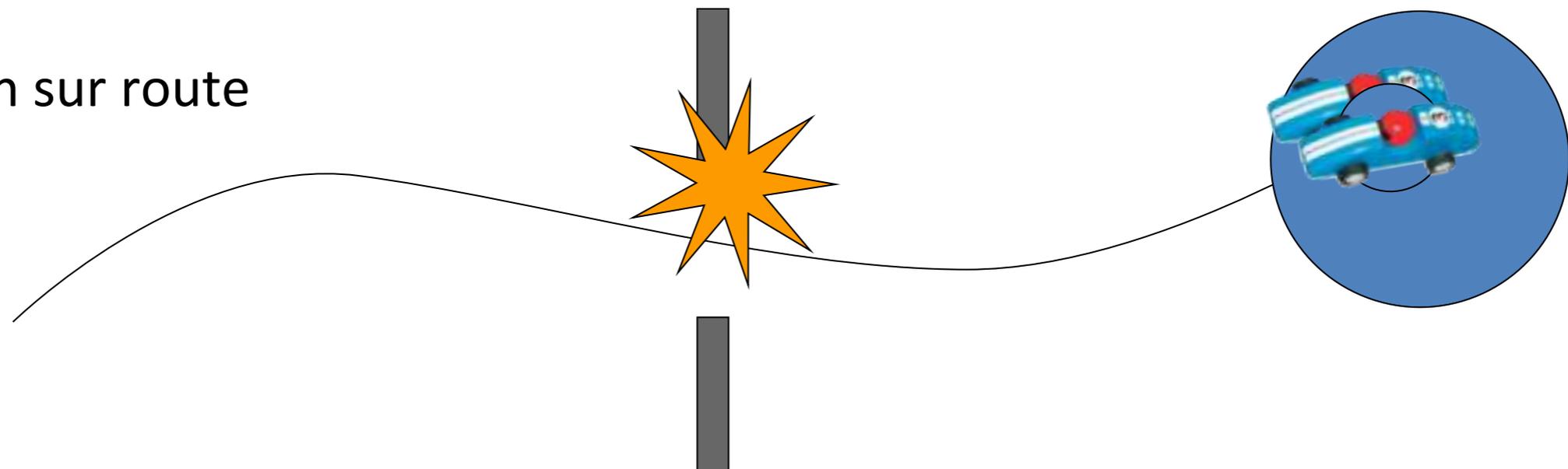
Utilisation de la confiance lors de la navigation

La confiance dans la position doit être suffisante pour la réalisation de la mission

Atterrissage d'un avion



Navigation sur route



Intégrité

Capacité à associer à un résultat une indication fiable de confiance.

Définition aviation civile

- Limite d'alerte : erreur maximale tolérable dans la solution de position
- Time to alert : temps maximal entre l'occurrence d'une condition d'alerte et son signalement
- Risque d'intégrité : probabilité que l'erreur de position dépasse la limite d'alerte sans que l'utilisateur n'en soit informé

[RTCA/DO-229D]

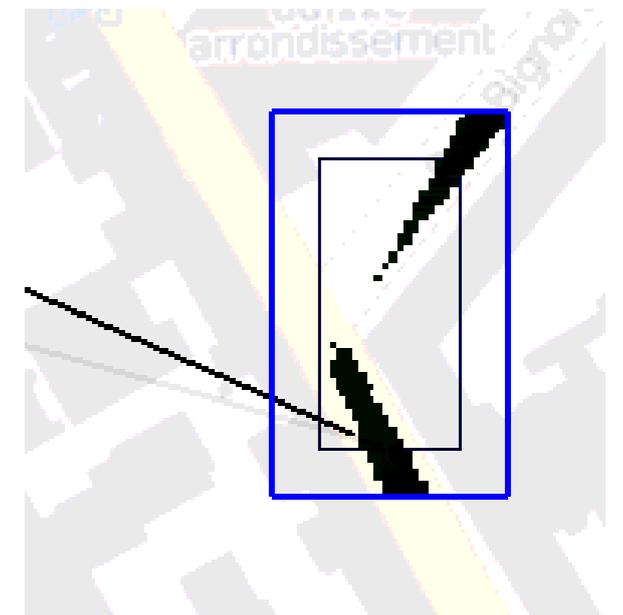
Approche ensembliste

On calcule un domaine de confiance pour la localisation

Ensemble des positions compatibles avec les mesures et les contraintes, associé au risque que cet ensemble ne contienne pas la vraie position

Analyse par intervalles dans un cadre à erreurs bornées

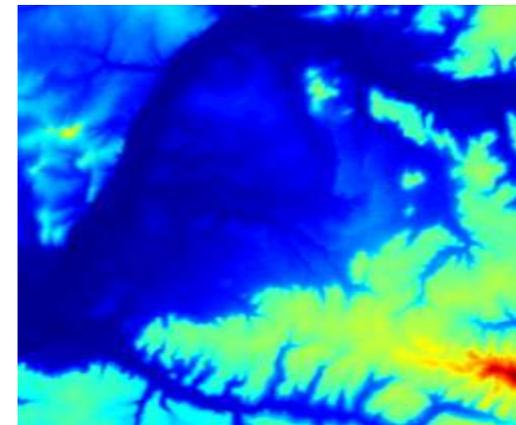
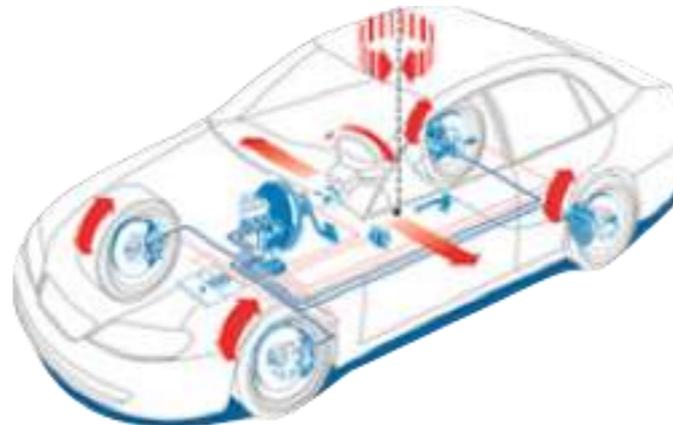
- Ensemble de forme arbitraire
- Robuste aux mesures aberrantes
- Non connexe en cas d'ambiguïté



Plan

- 1. Technologies et données pour la localisation**
- 2. Calcul classique d'intégrité**
- 3. Approche ensembliste pour l'intégrité de la localisation statique**
- 4. Localisation dynamique à partir d'un historique de données**
- 5. Conclusion**

Technologies et données pour la localisation



Les Systèmes de Positionnement par Satellites (GNSS)

Opérationnels : NAVSTAR GPS, GLONASS

En construction : GALILEO, BeiDou

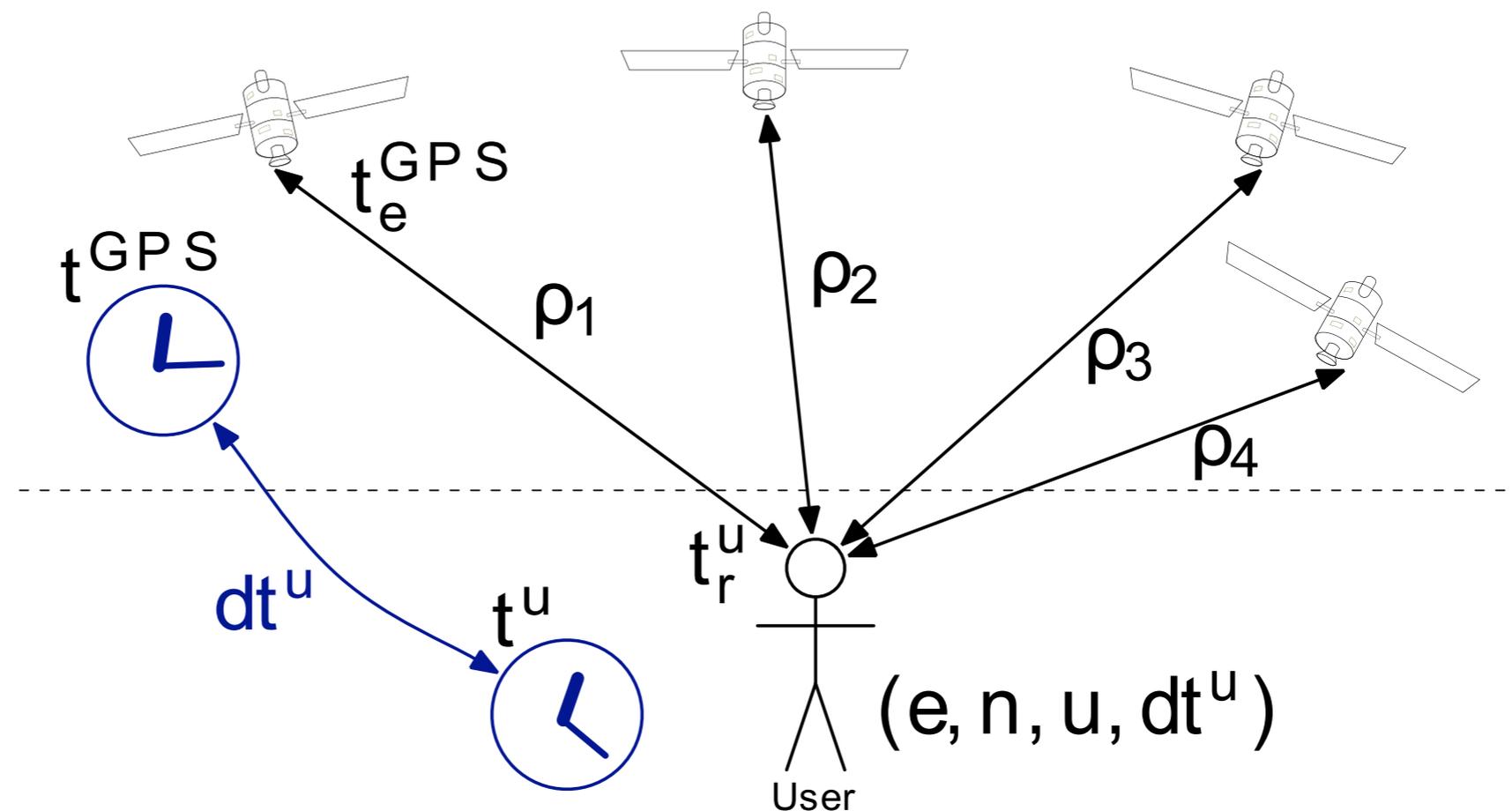


- système de positionnement global
- position absolue, idéale pour la navigation sur carte
- bon marché, précis en environnement dégagé
- dépendant de la visibilité des satellites



Les Systèmes de Positionnement par Satellites (GNSS)

Pseudodistances : mesures de temps de vol

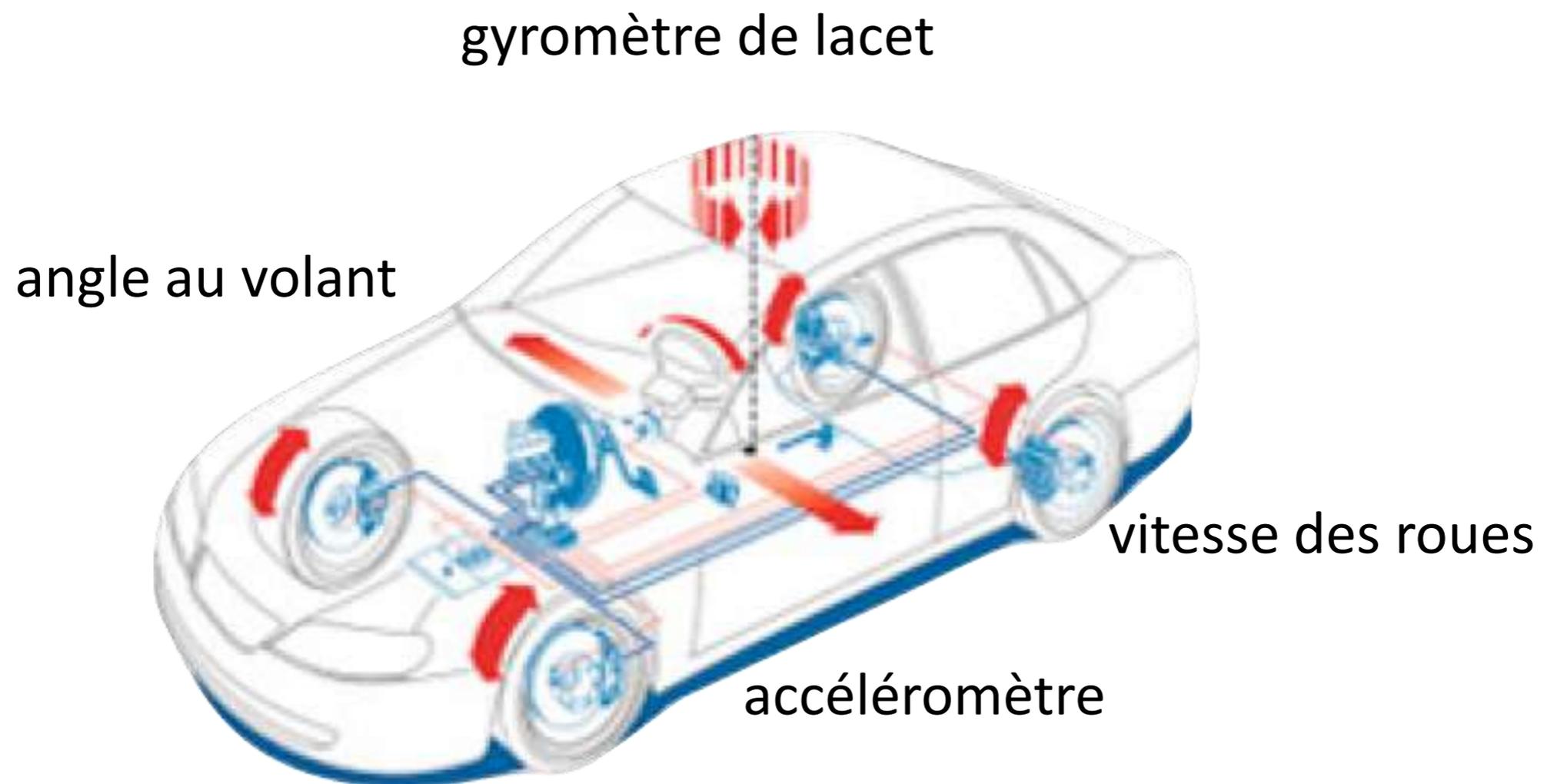


$$\begin{cases} \rho_1 = \sqrt{(x - x_{s1})^2 + (y - y_{s1})^2 + (z - z_{s1})^2} + c \cdot dt_u \\ \rho_2 = \sqrt{(x - x_{s2})^2 + (y - y_{s2})^2 + (z - z_{s2})^2} + c \cdot dt_u \\ \dots \\ \rho_p = \sqrt{(x - x_{sp})^2 + (y - y_{sp})^2 + (z - z_{sp})^2} + c \cdot dt_u \end{cases}$$

Capteurs Proprioceptifs

Accessibles via les CAN des véhicules modernes

Permettent de déterminer le déplacement du véhicule



Modèle Numérique de Terrain (MNT)

Représentation numérique de l'altitude

Maillage carré (métrique) ou pseudo-carré (méridiens-parallèles)

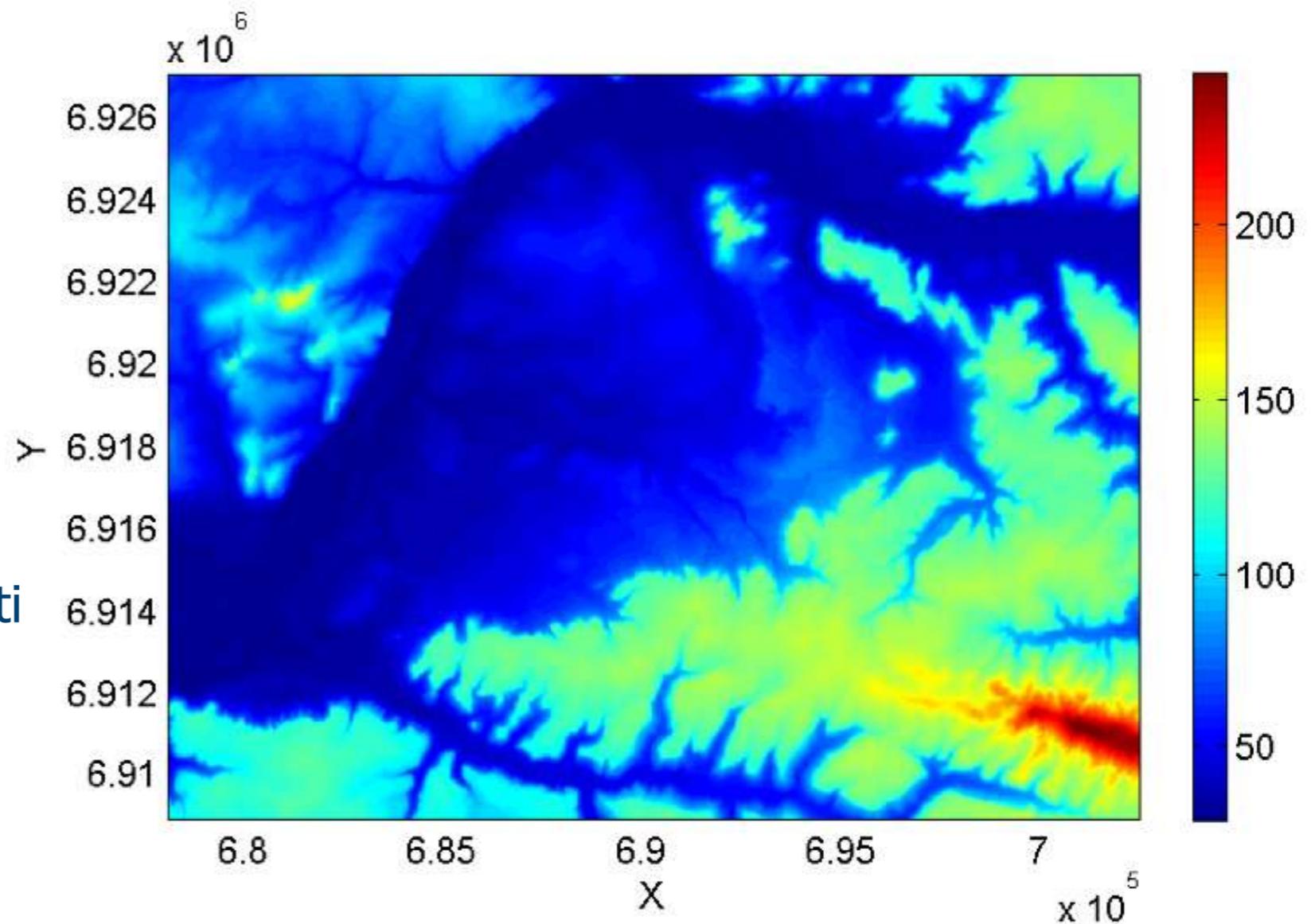
Exemples :

SRTM-3 (NASA) : Monde

- maillage 90 m / ± 14 m alti

MNT BD Topo (IGN) : France

- maillage 25 m / ± 1 m alti

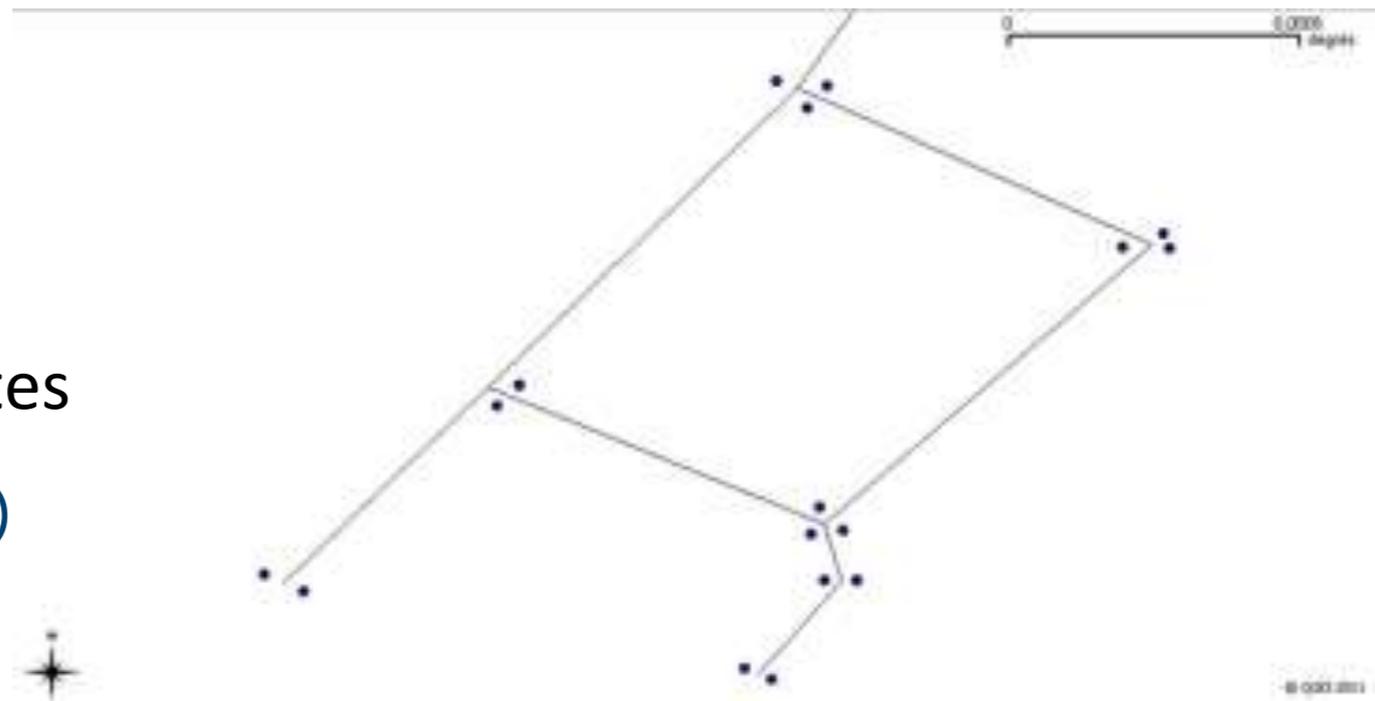


Cartographie

Linéaire

Polygones représentant les routes

- attributs (vitesse limite, etc)
- 3D par attribut d'altitude



[Betaille et al, 2008] Making an enhanced map for lane location based services

Surfacique

Surface représentant l'espace roulant

- délimitée par les trottoirs et obstacles
- points 3D
- facettes triangulaires

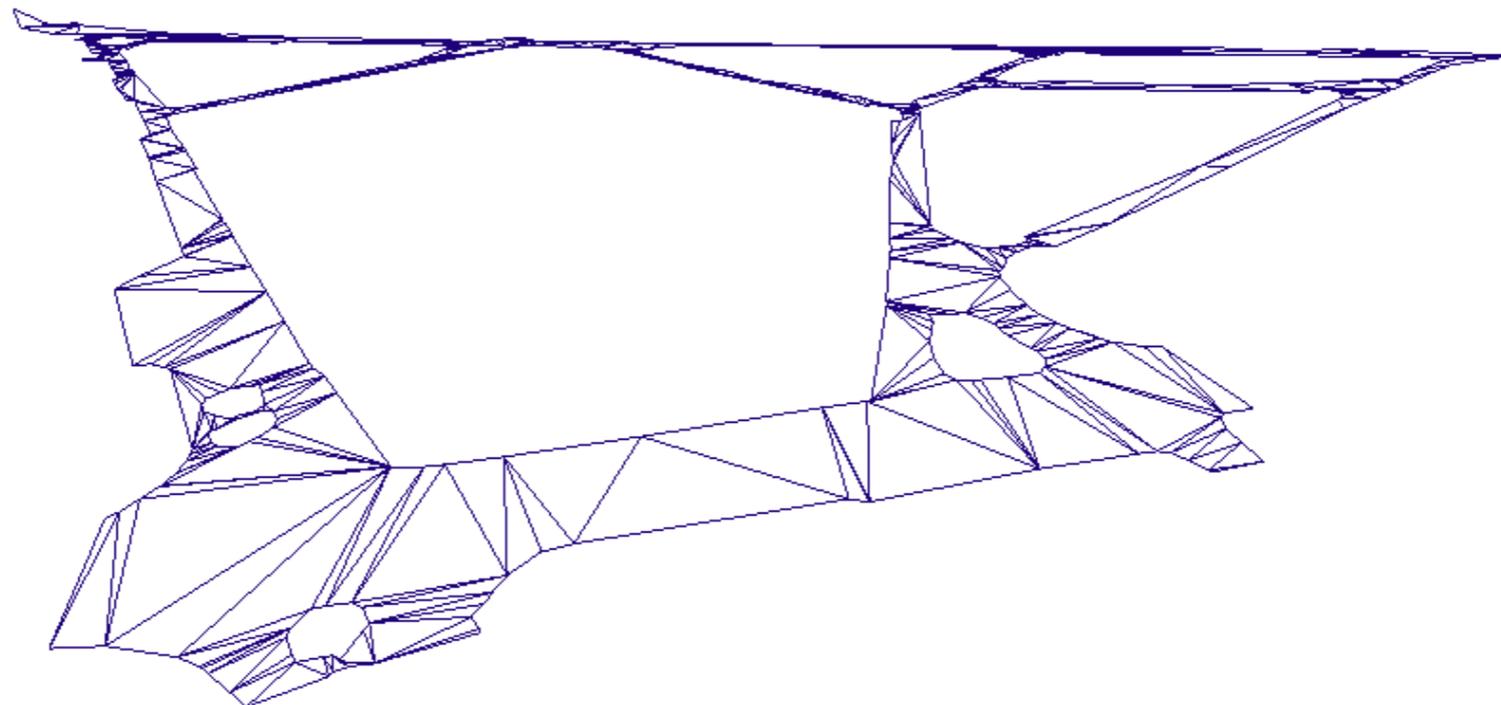


[Paparoditis et al, 2000] Surface reconstruction in urban areas from multiple views of aerial digital frame cameras

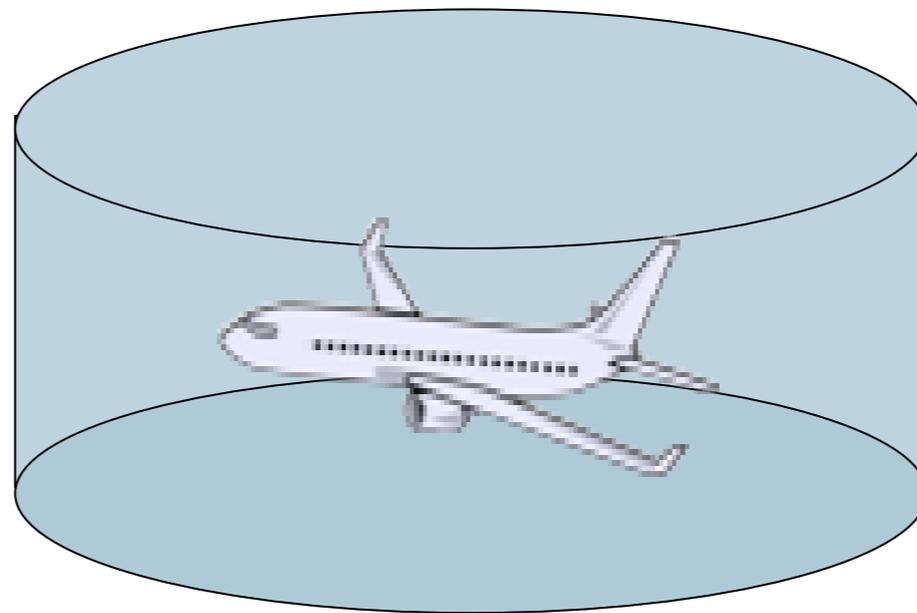
Carte 3D, Mairie du XII^e arrondissement de Paris

Produite par l'*Institut Géographique National*

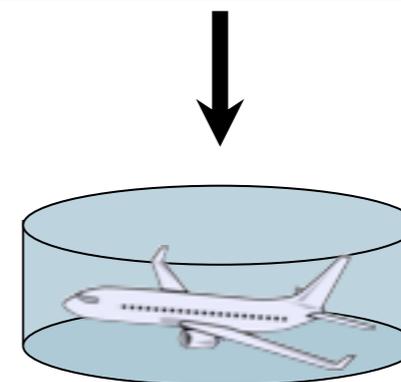
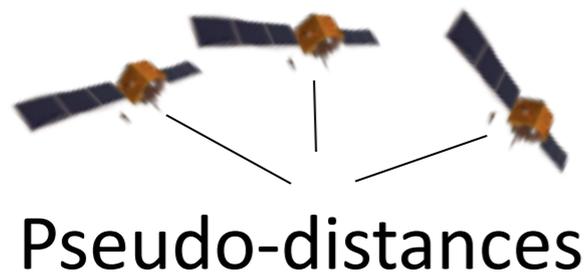
- Photogrammétrie photos aériennes
- Surface générée à partir des bords de voie
- Précision des sommets : 5 cm en XY / 20 cm en Z
- 572 facettes triangulaires



Calcul classique d'intégrité



Surveillance autonome d'intégrité



Niveau de protection

[Teunissen, 1990] Quality Control in Integrated Navigation Systems

[Brown, 1987] Receiver autonomous integrity monitoring using a 24-satellite GPS constellation

Détection de faute : Test du χ^2

Somme des résidus au carré (NSSE)

Pas de faute : NSSE suit une loi du Chi-2 centrée

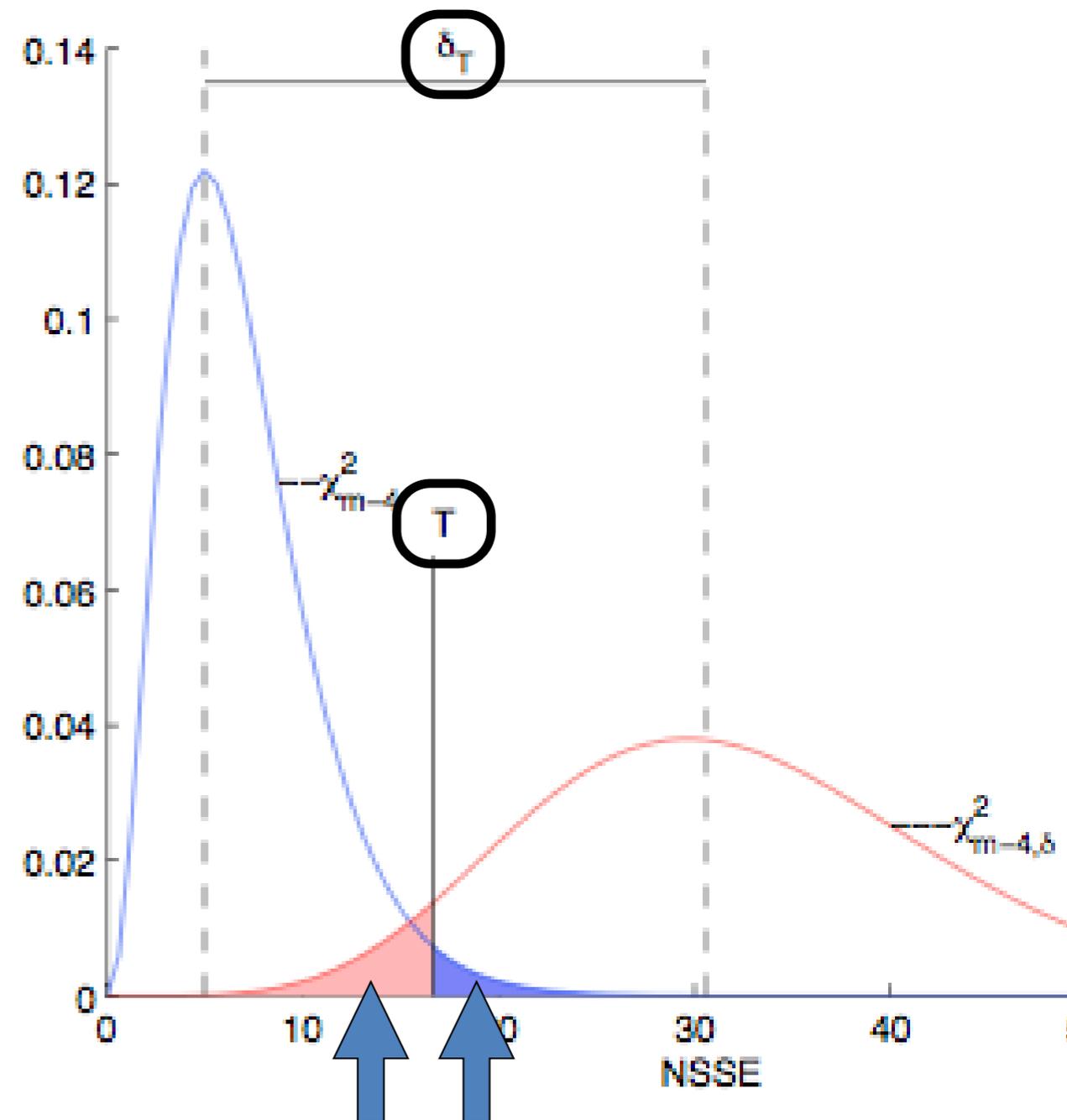
Faute : NSSE suit une loi du Chi-2 non-centrée

Probabilité de fausse alarme

Définit le seuil T du test

Probabilité de non-détection

Définit le paramètre de non-centralité δ



Intégrité interne

Minimal Detectable Bias (MDB)

Erreur minimale de pseudo-distance qui peut être détectée avec une probabilité de non détection donnée

Sous hypothèse d'un seul défaut à la fois :

$$MDB_i = \frac{\sigma_i \sqrt{\delta}}{\sqrt{S_{i,i}}}$$

bruit de mesure \rightarrow $\sigma_i \sqrt{\delta}$ \leftarrow P_{FA} et P_{MD}

\leftarrow géométrie \rightarrow $S_{i,i}$

Intégrité externe

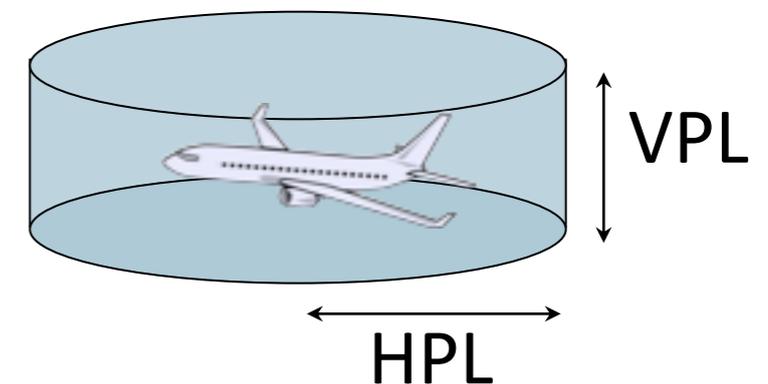
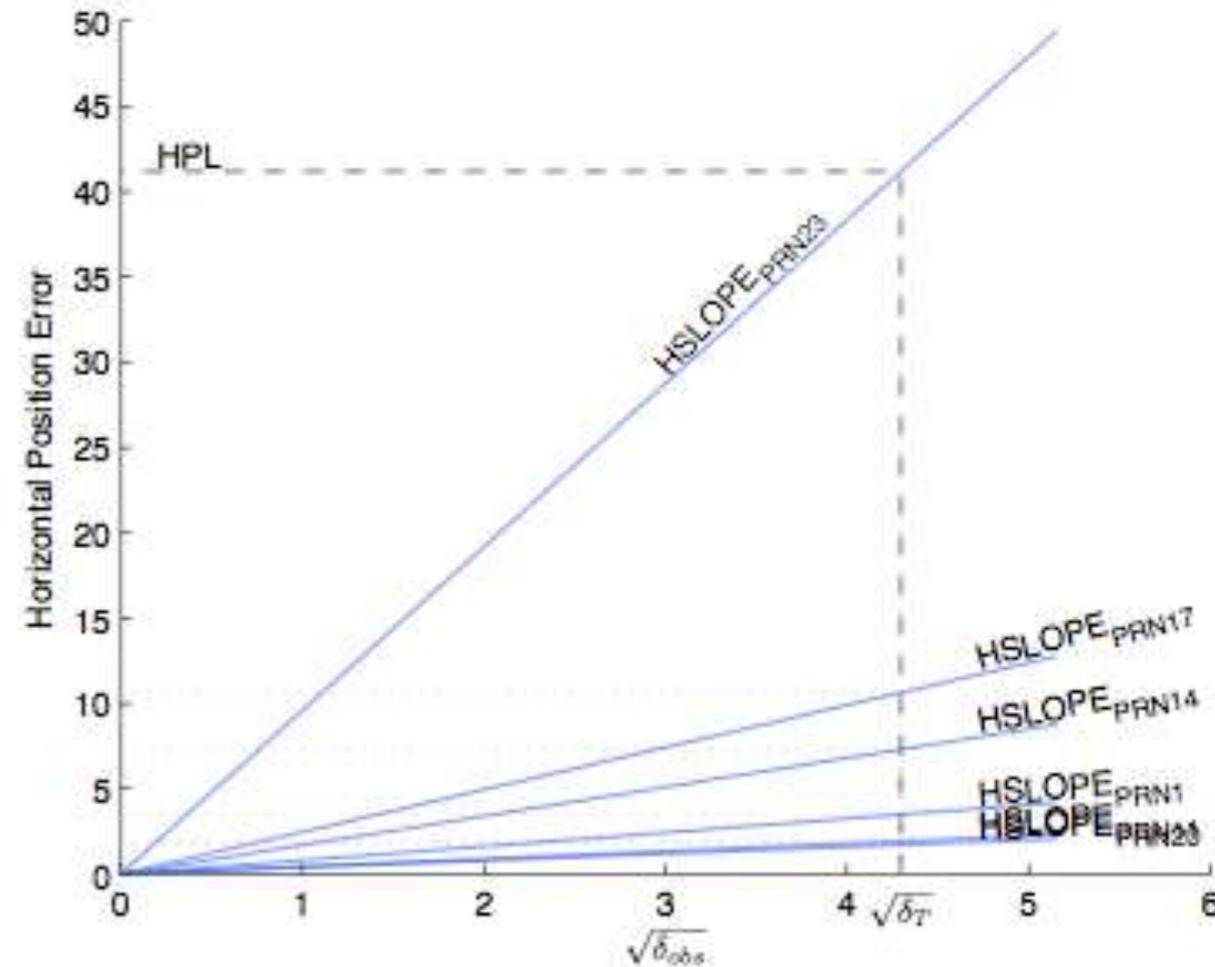
Impact des défauts sur l'erreur de position

HPL, VPL : Niveaux de protection

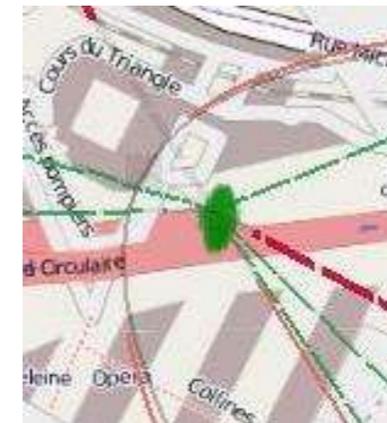
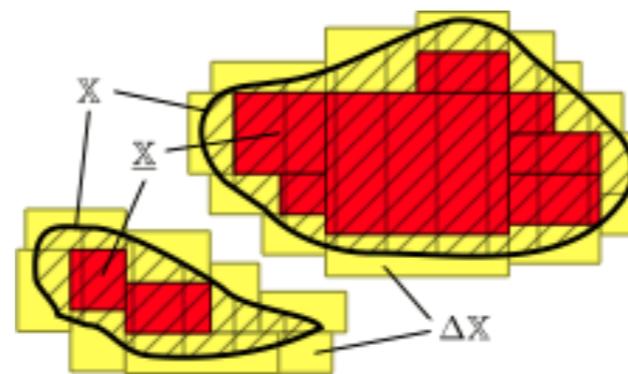
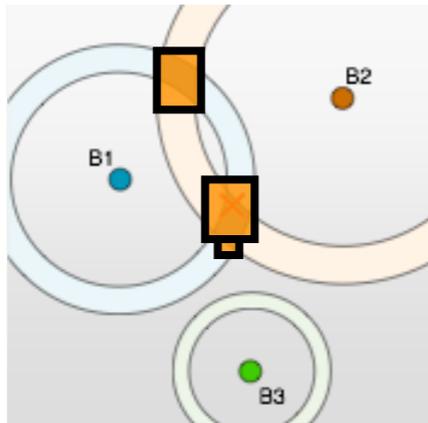
Bornes *a priori* de l'erreur de position résultant d'une faute non détectée

HUL, VUL : Niveaux d'incertitude

Bornes de l'erreur de position en fonction de la valeur courante des résidus



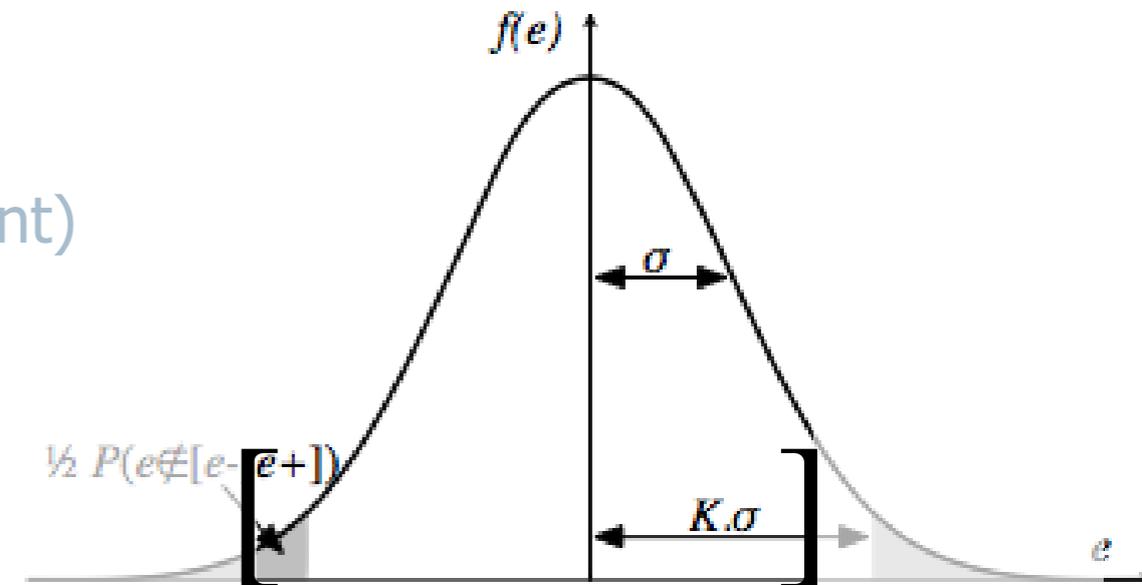
Approche ensembliste pour l'intégrité de la localisation statique



Approche ensembliste

Les mesures sont des intervalles

- Soit les bruits sont bornés (données fabricant)
- Soit on choisit les bornes en fonction d'une densité de probabilité



La localisation est un problème de satisfaction de contraintes

- Mesures = Contraintes sur la position
- Position = Intersection des contraintes

Exemple : Contrainte de pseudodistance

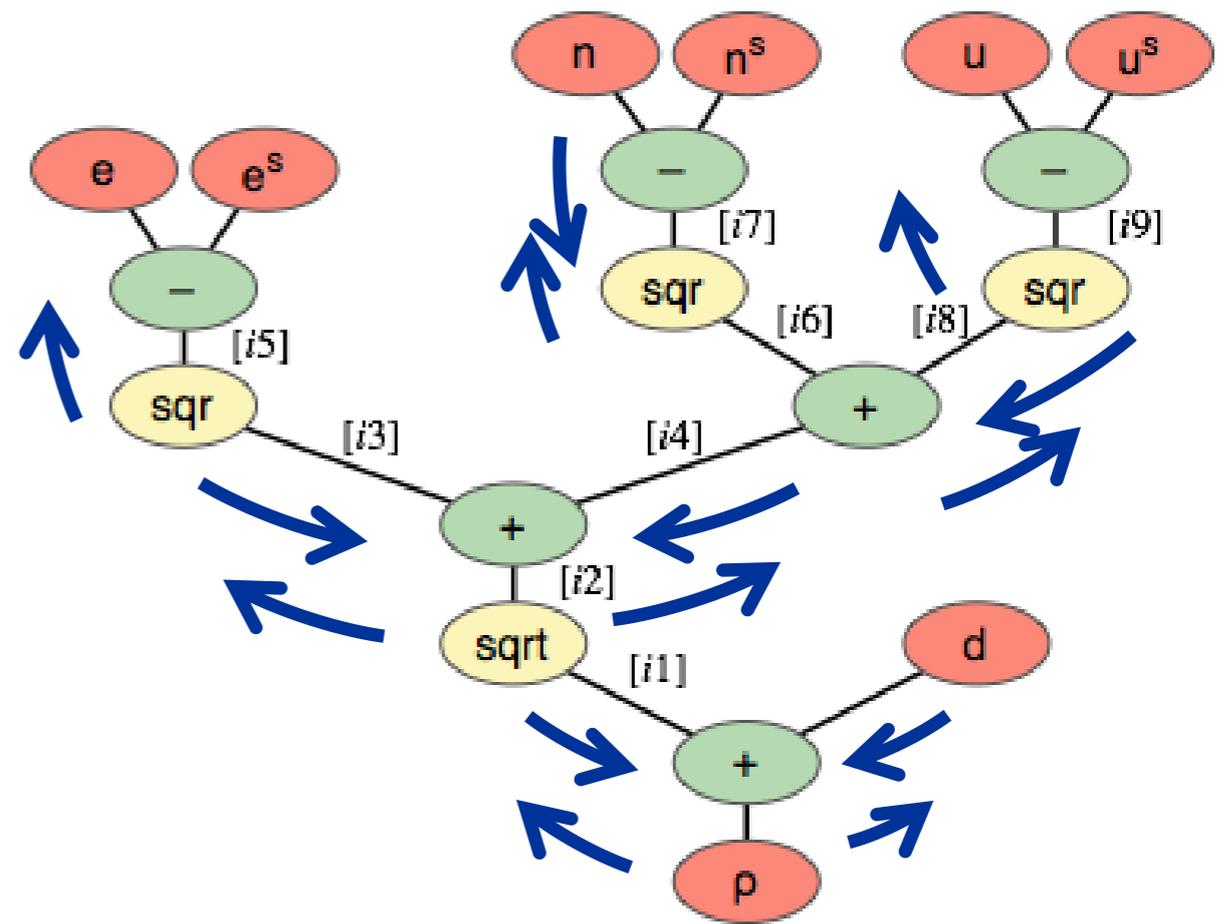
Chaque pseudodistance est une contrainte sur la position

$$[\rho_i] = \sqrt{([e] - [e_i^s])^2 + ([n] - [n_i^s])^2 + ([u] - [u_i^s])^2} + [d]$$

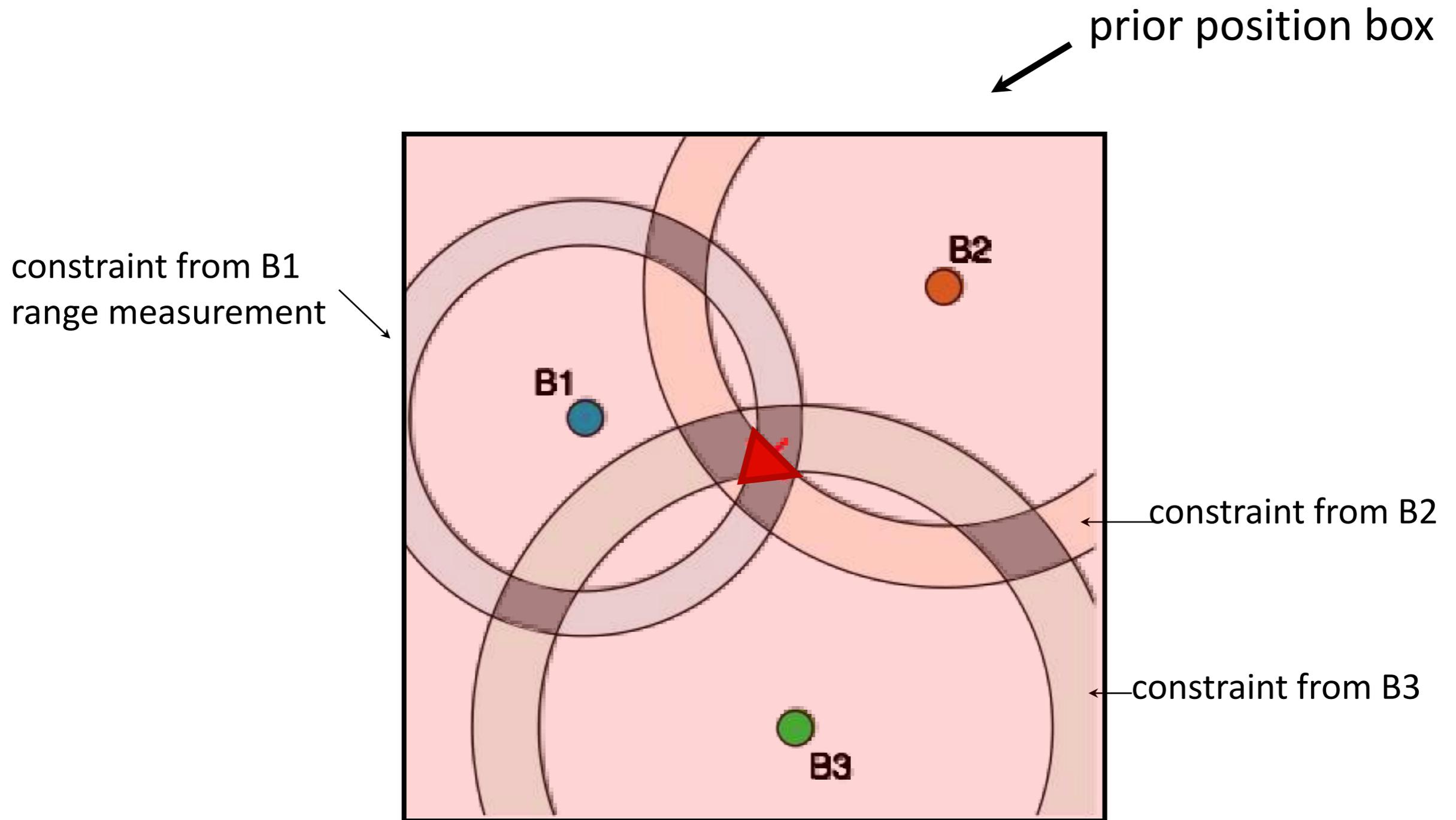
La position est contractée en utilisant la propagation de contraintes

Les domaines des variables sont réduits sans perdre de solution

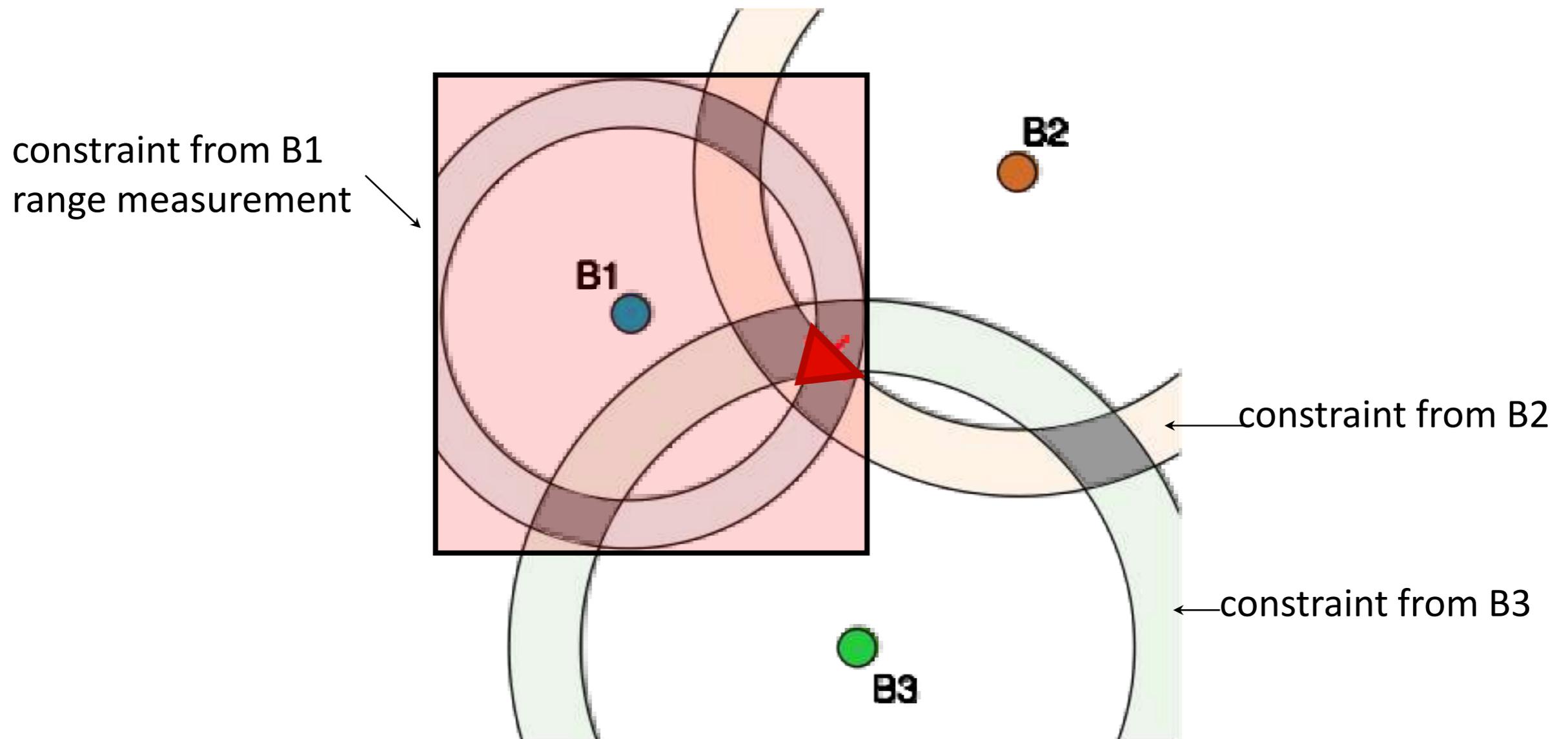
On applique la contraction avec chaque pseudodistance, jusqu'à un point fixe



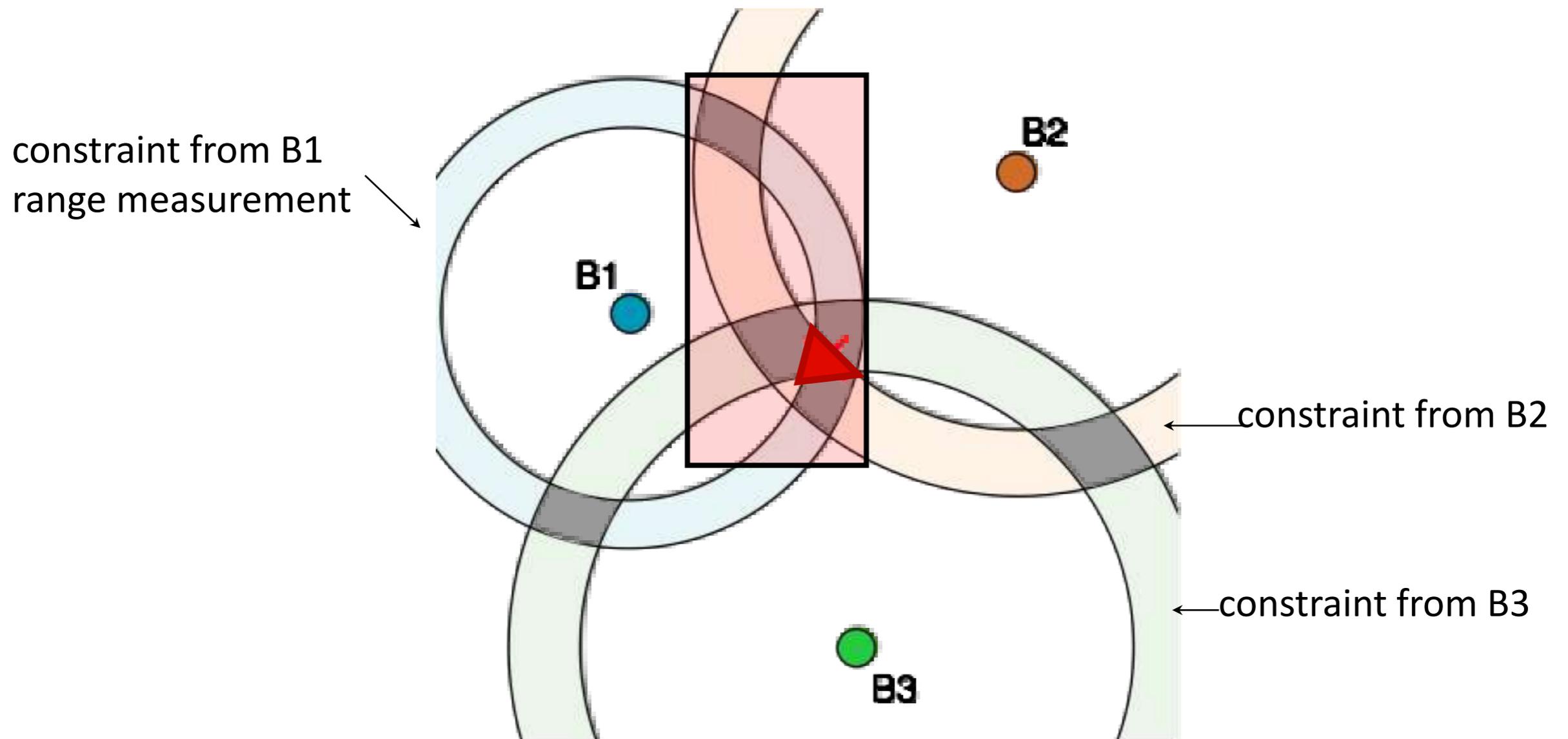
Exemple simplifié en 2D : contraction



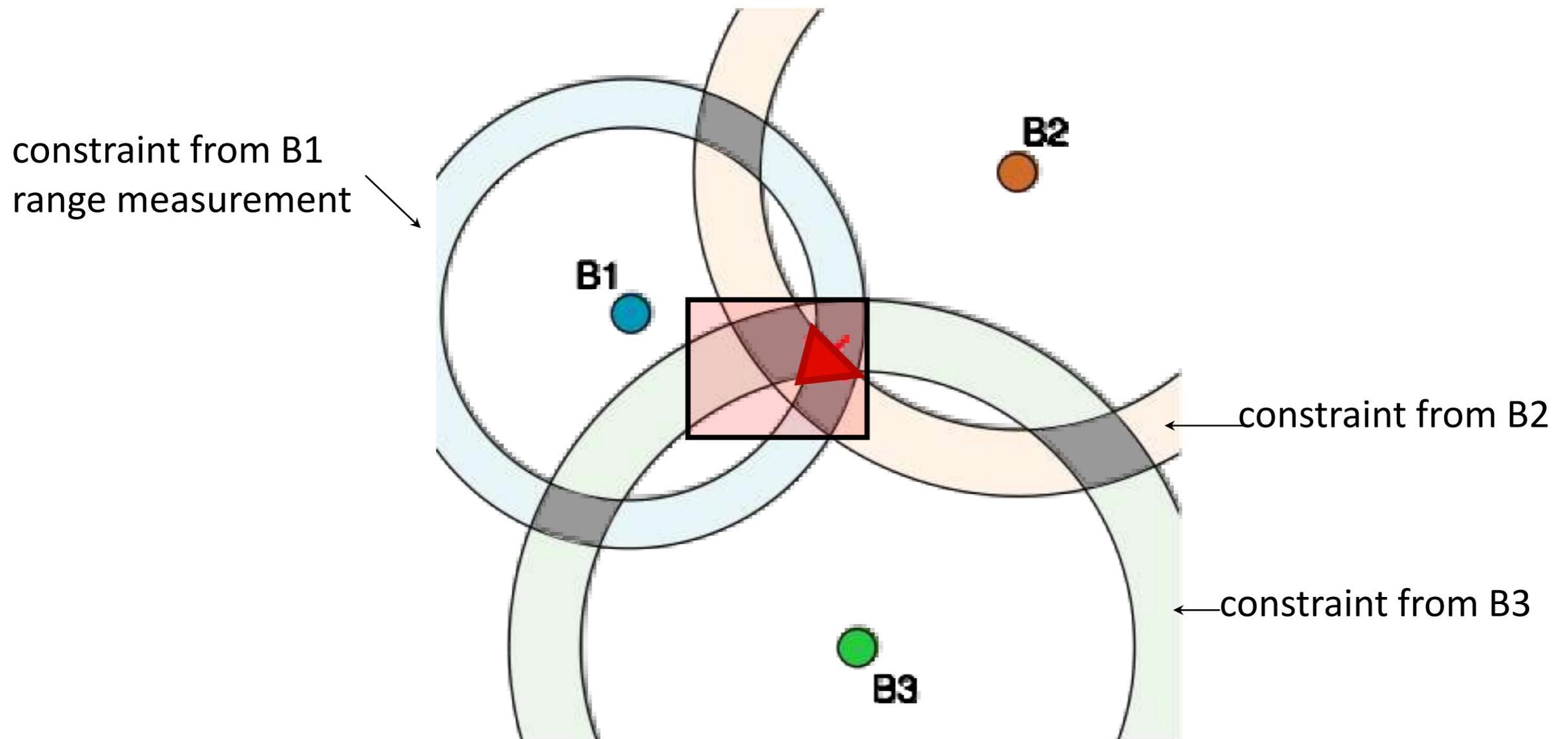
Exemple simplifié en 2D : contraction



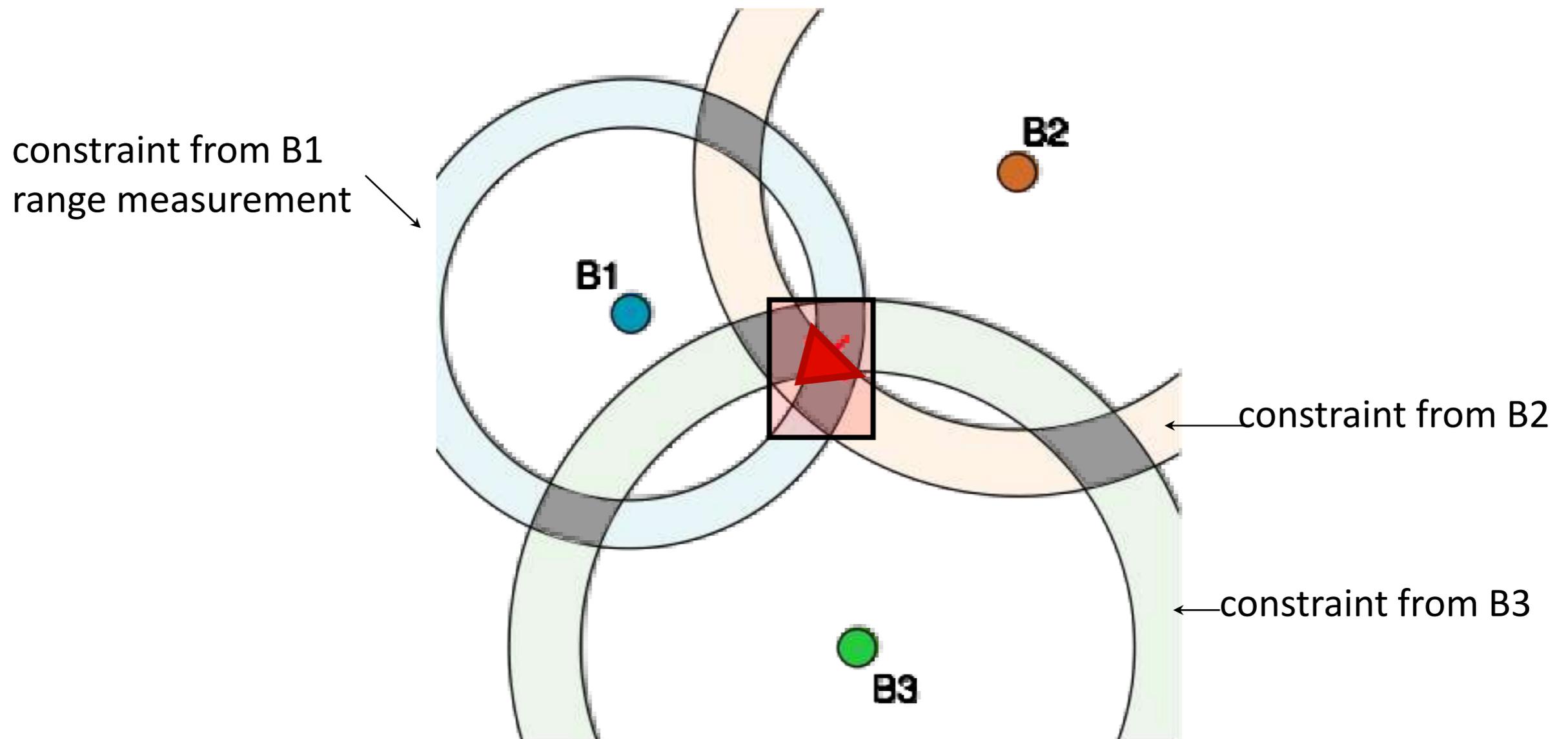
Exemple simplifié en 2D : contraction



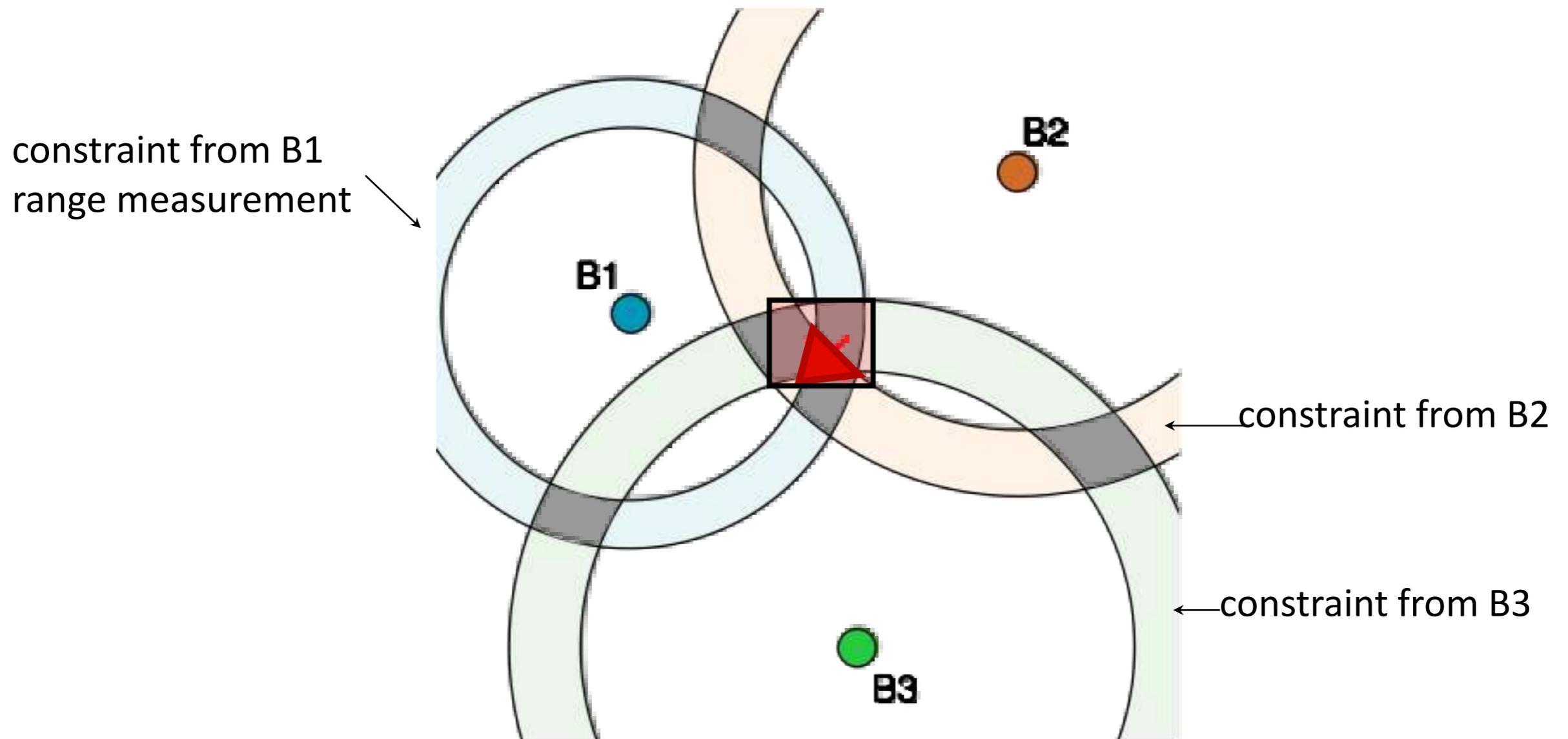
Exemple simplifié en 2D : contraction



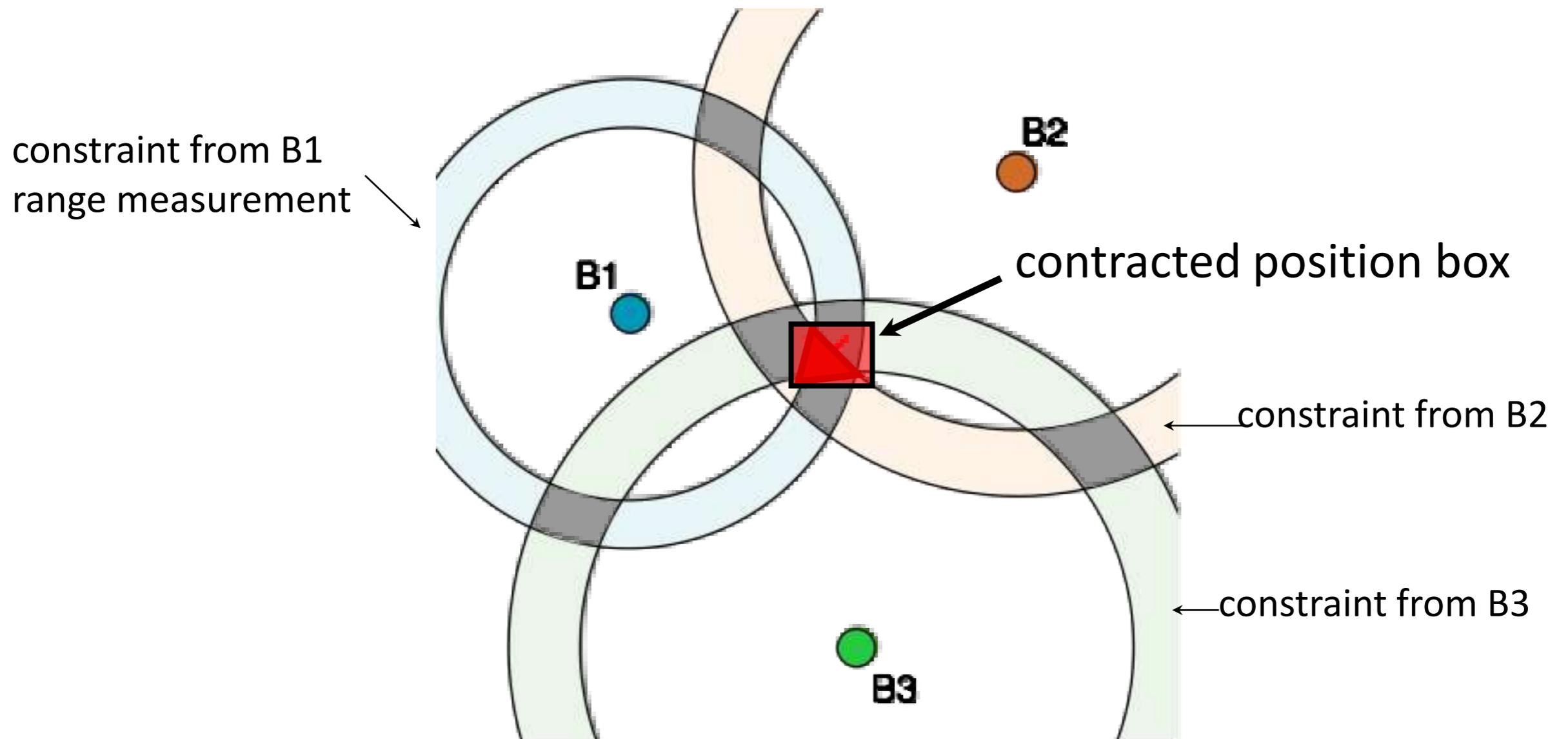
Exemple simplifié en 2D : contraction



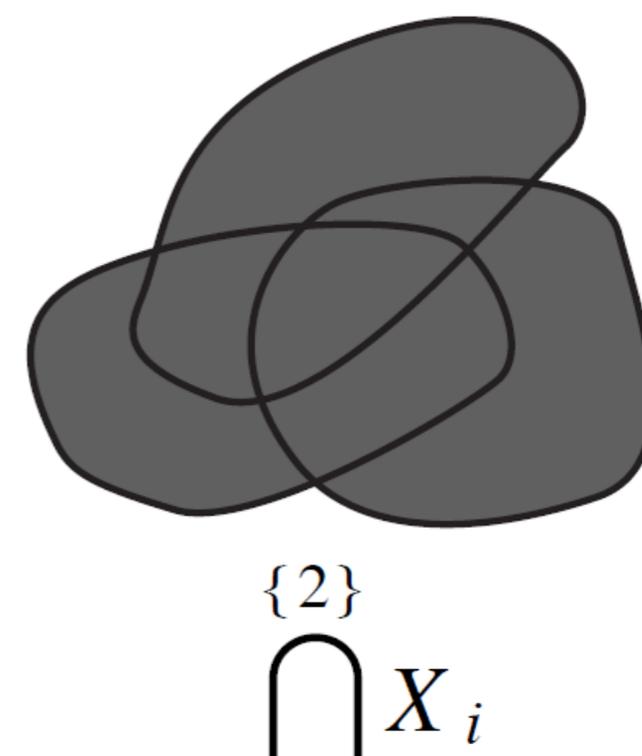
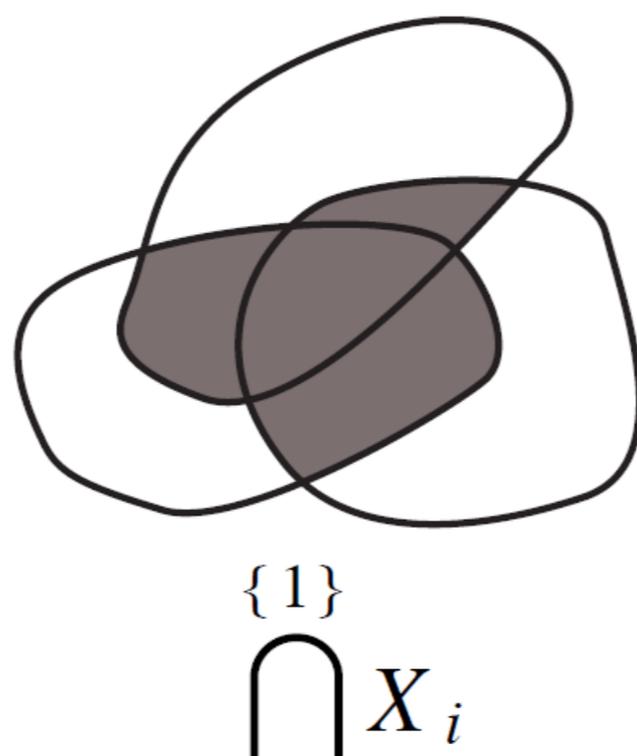
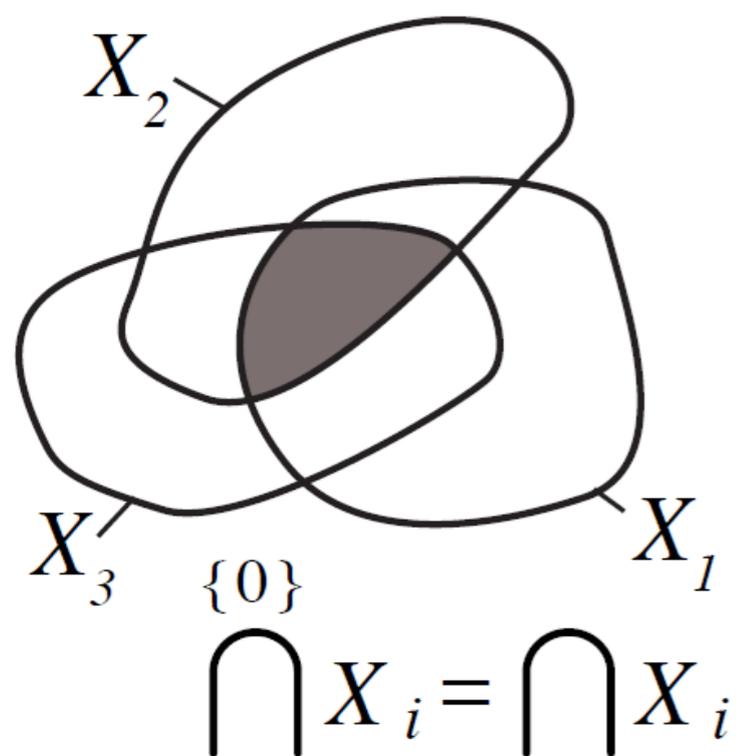
Exemple simplifié en 2D : contraction



Exemple simplifié en 2D : contraction

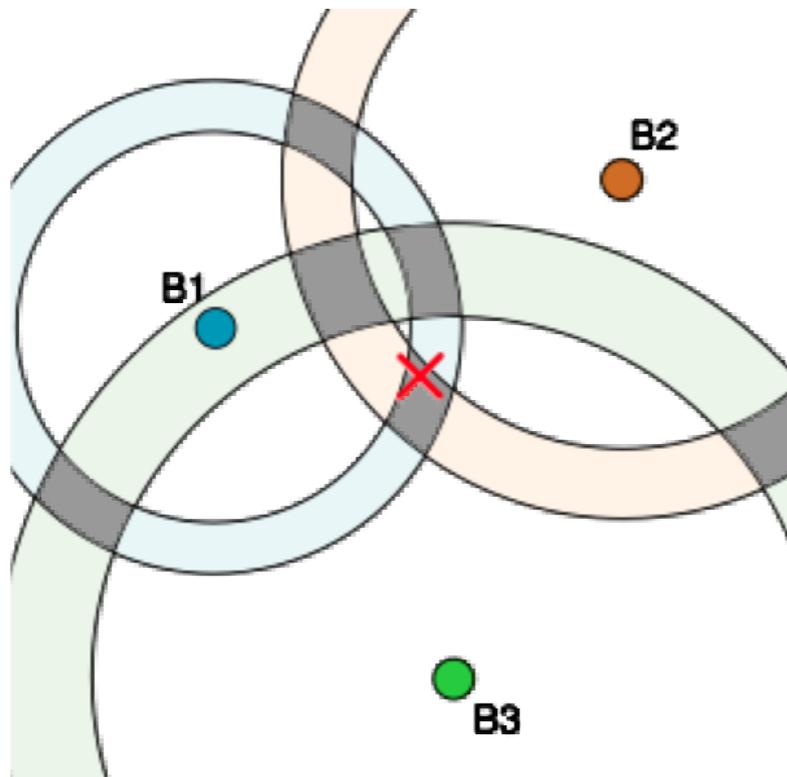


Intersection q-relaxée

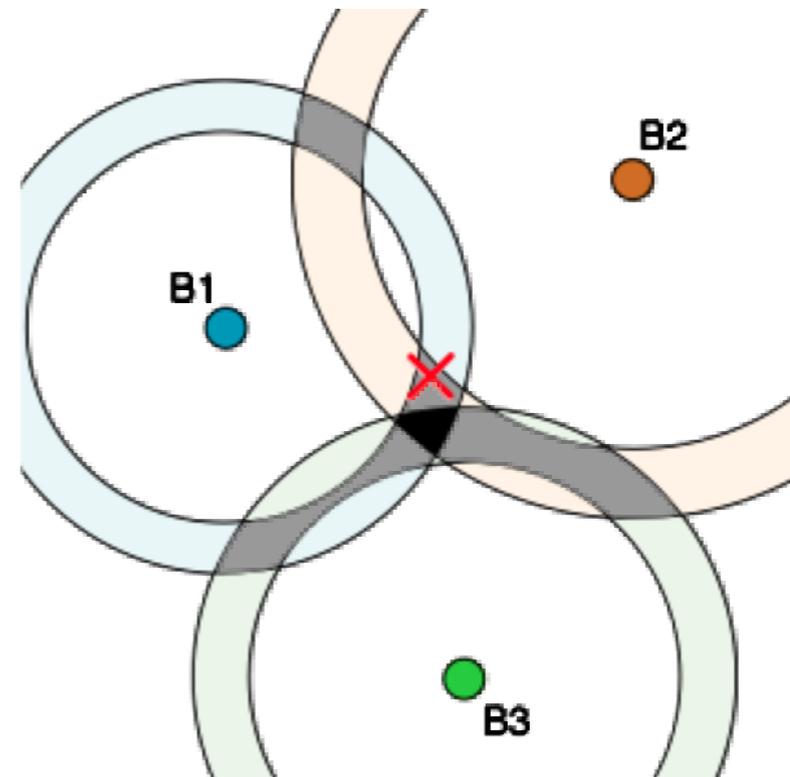


Conséquences des mesures aberrantes

Solution vide

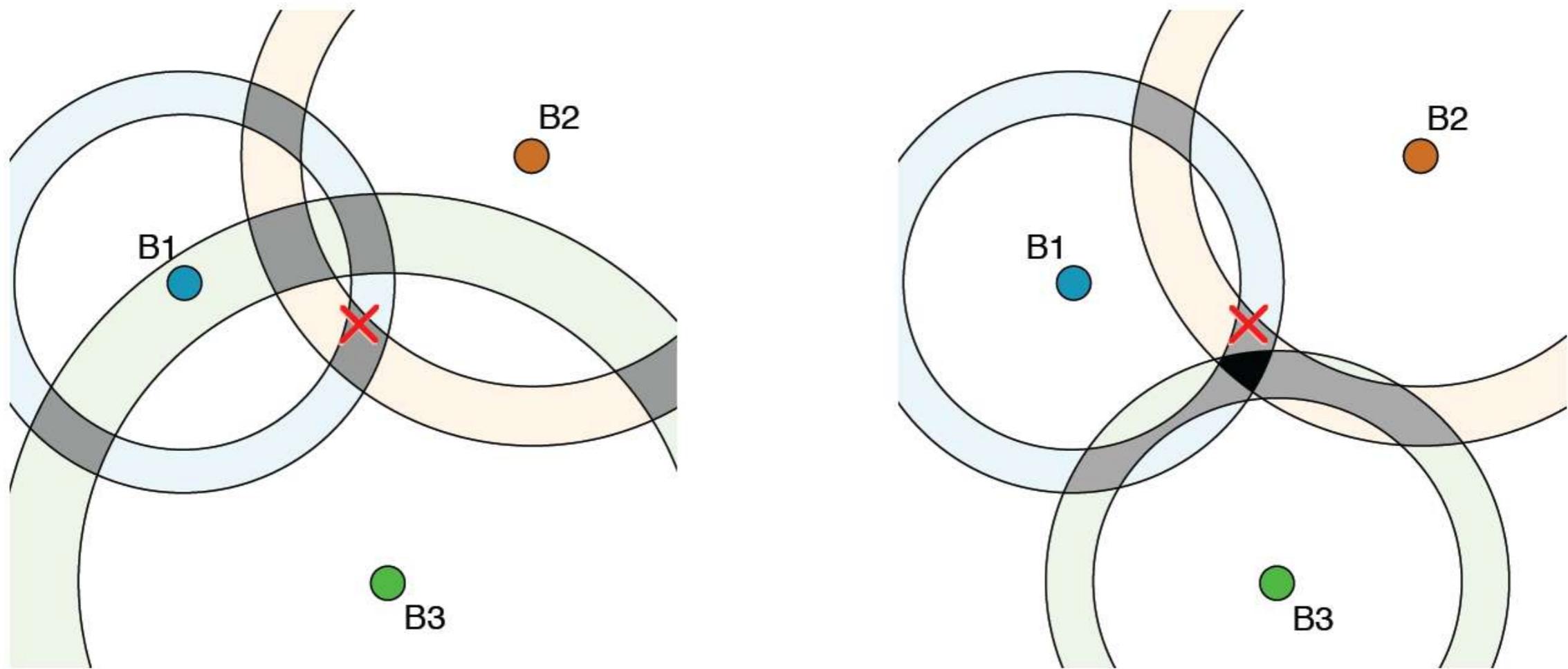


Solution erronée



L'intersection de *toutes* les contraintes n'est pas robuste

Robustesse aux mesures aberrantes : relaxation de contraintes

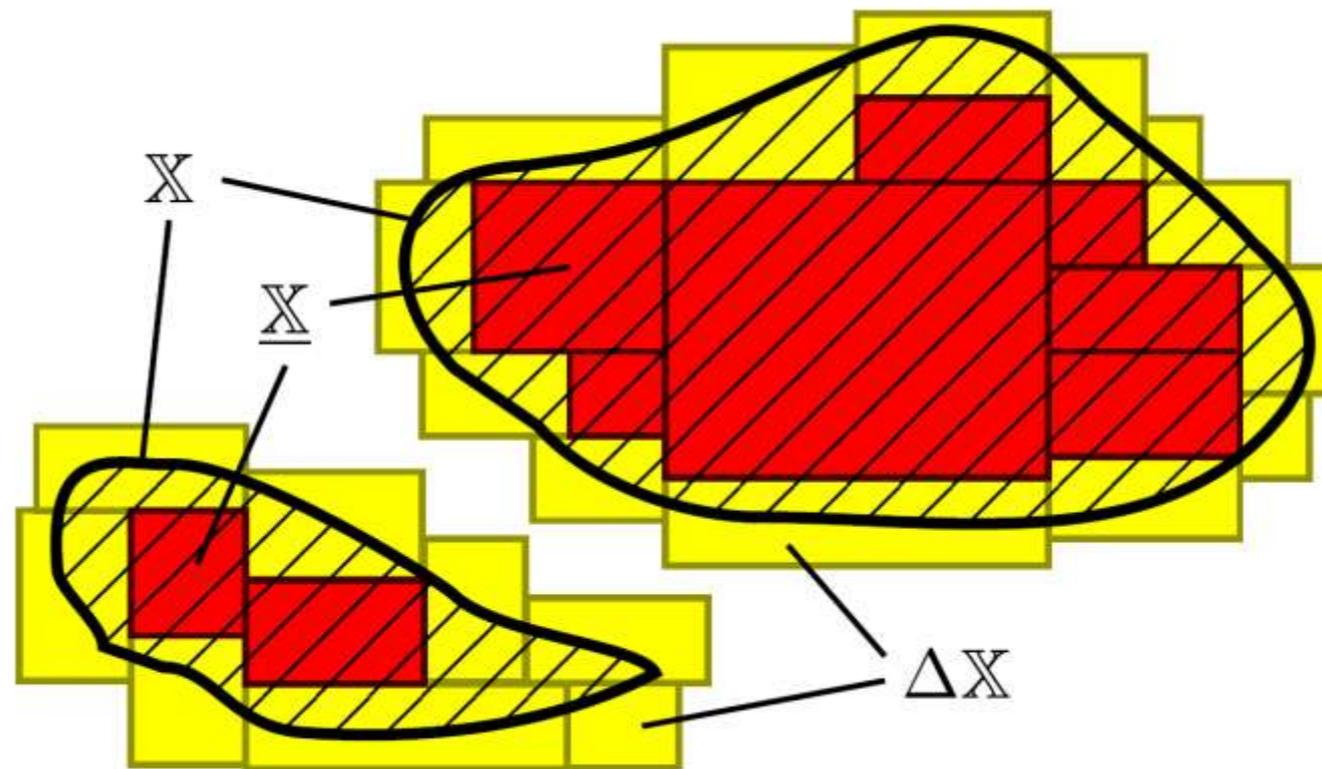


Robustesse : Intersection *d'au moins $m-q$* contraintes.
-> intersection q-relaxée

Sous-pavages

La boîte englobante ne fournit qu'une approximation grossière, souvent trop pessimiste

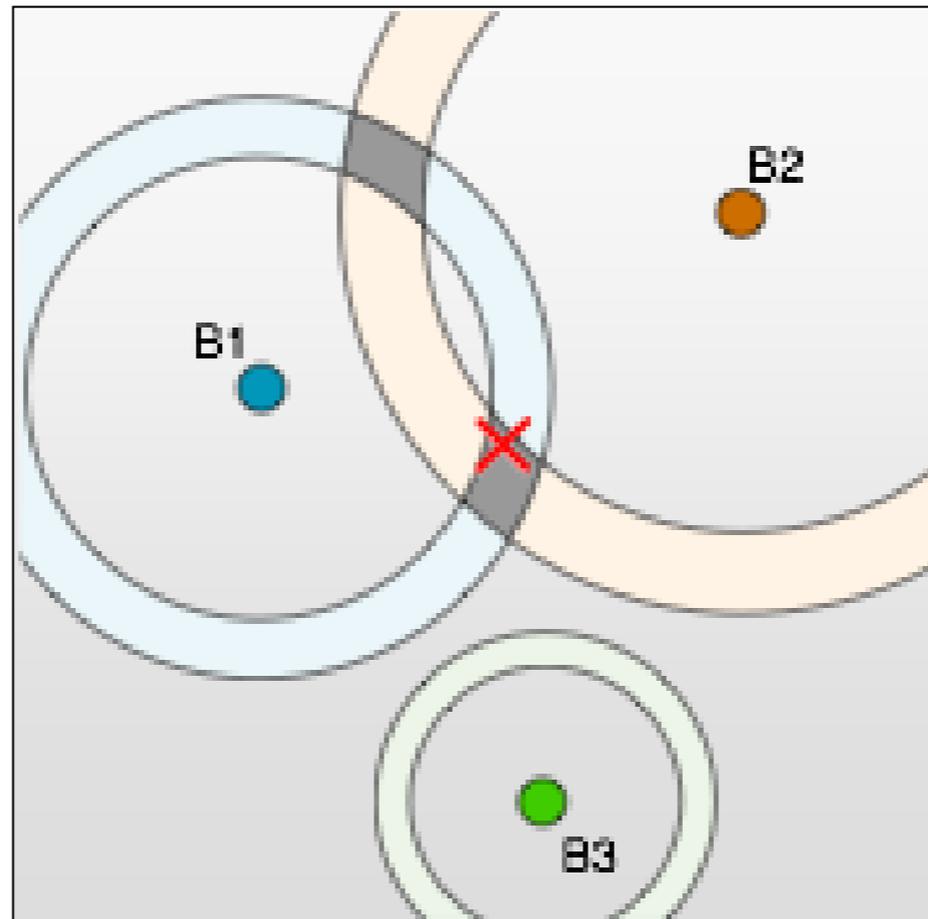
Les sous-pavages permettent de représenter des ensembles quelconques

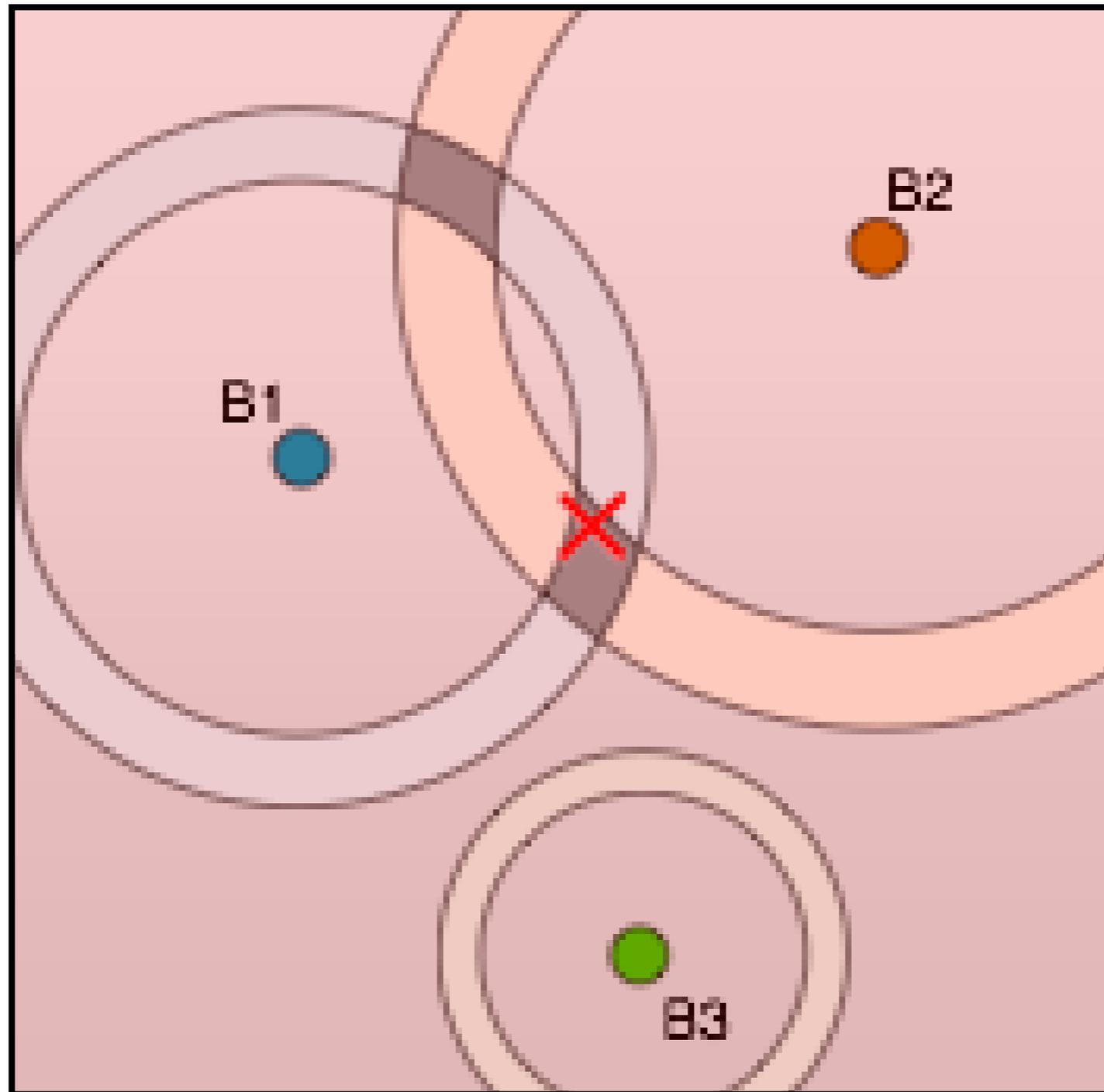


[Jaulin et al, 2001] Applied Interval Analysis

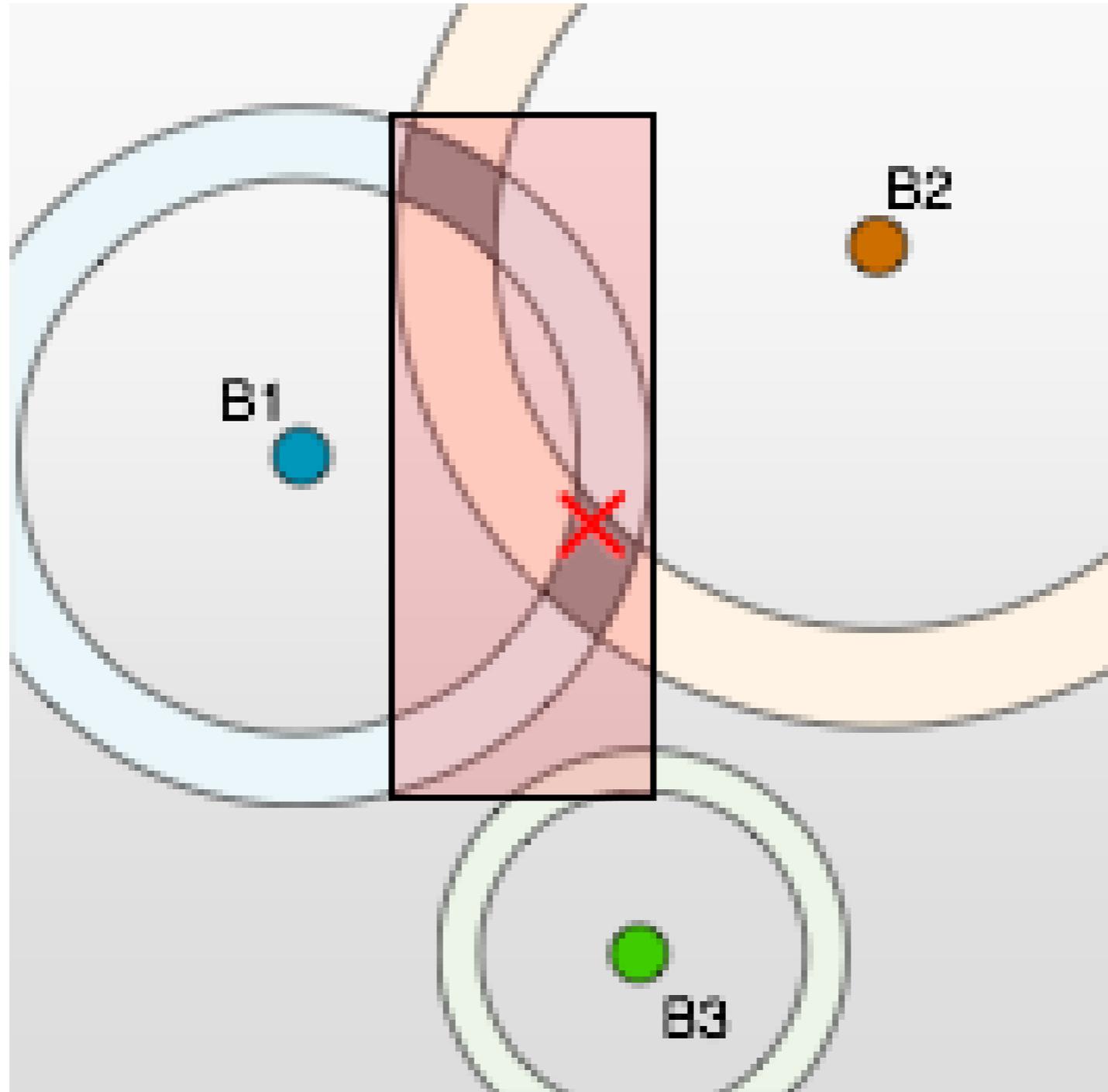
SIVIA : Set Inversion via Interval Analysis

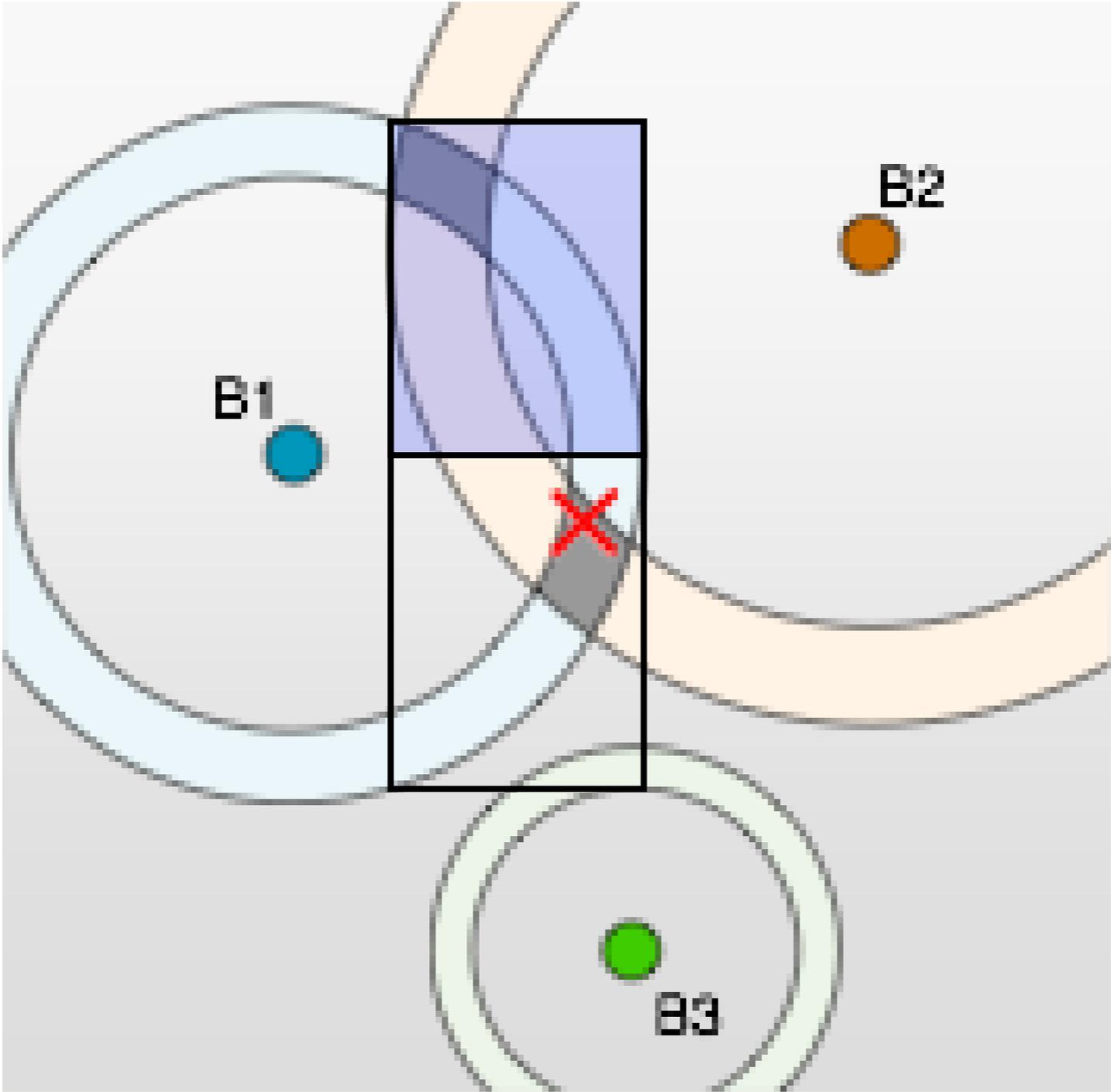
- Contractions et bisections successives d'une boîte initiale
- Exemple: solution 1-relaxée

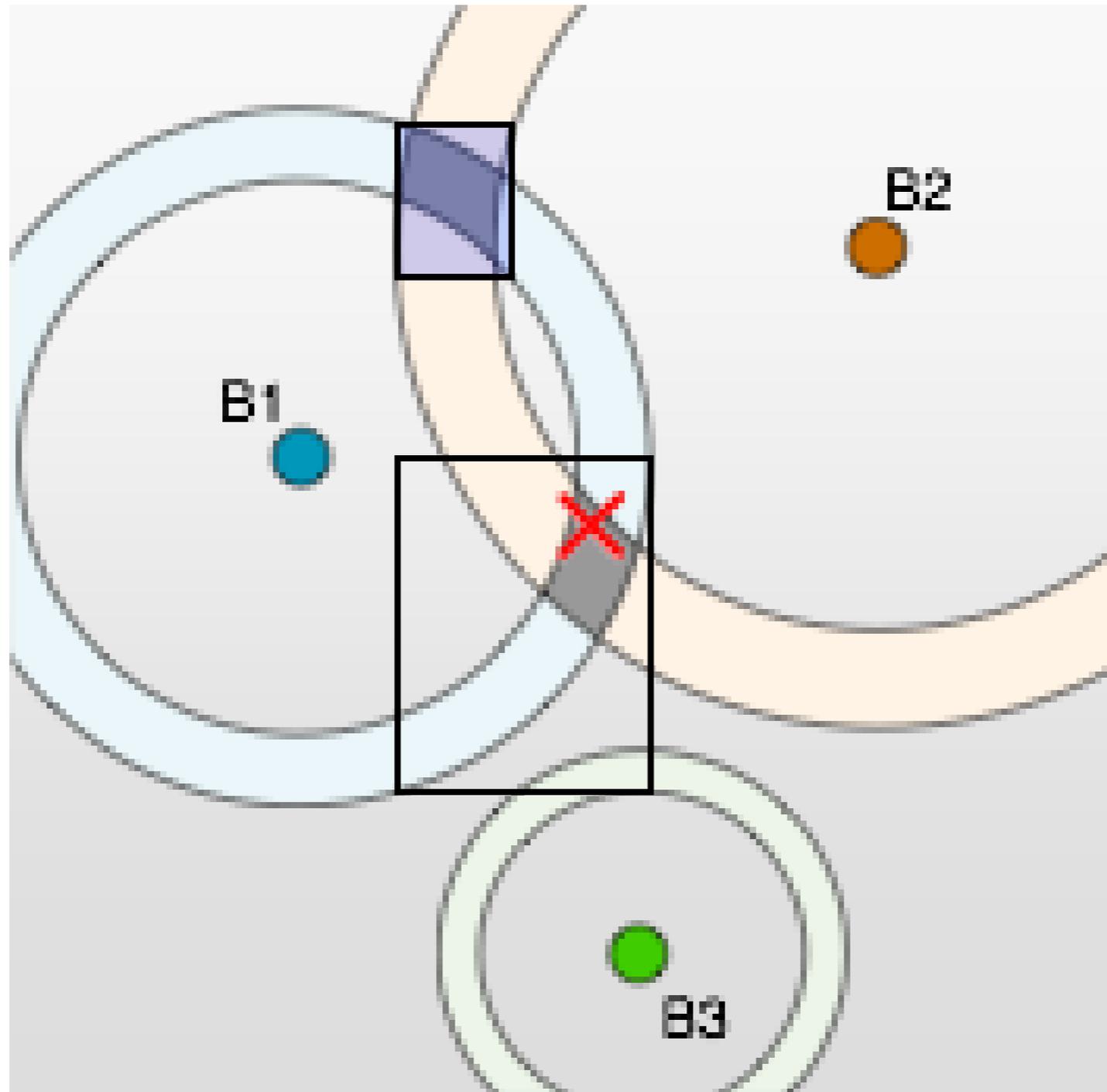


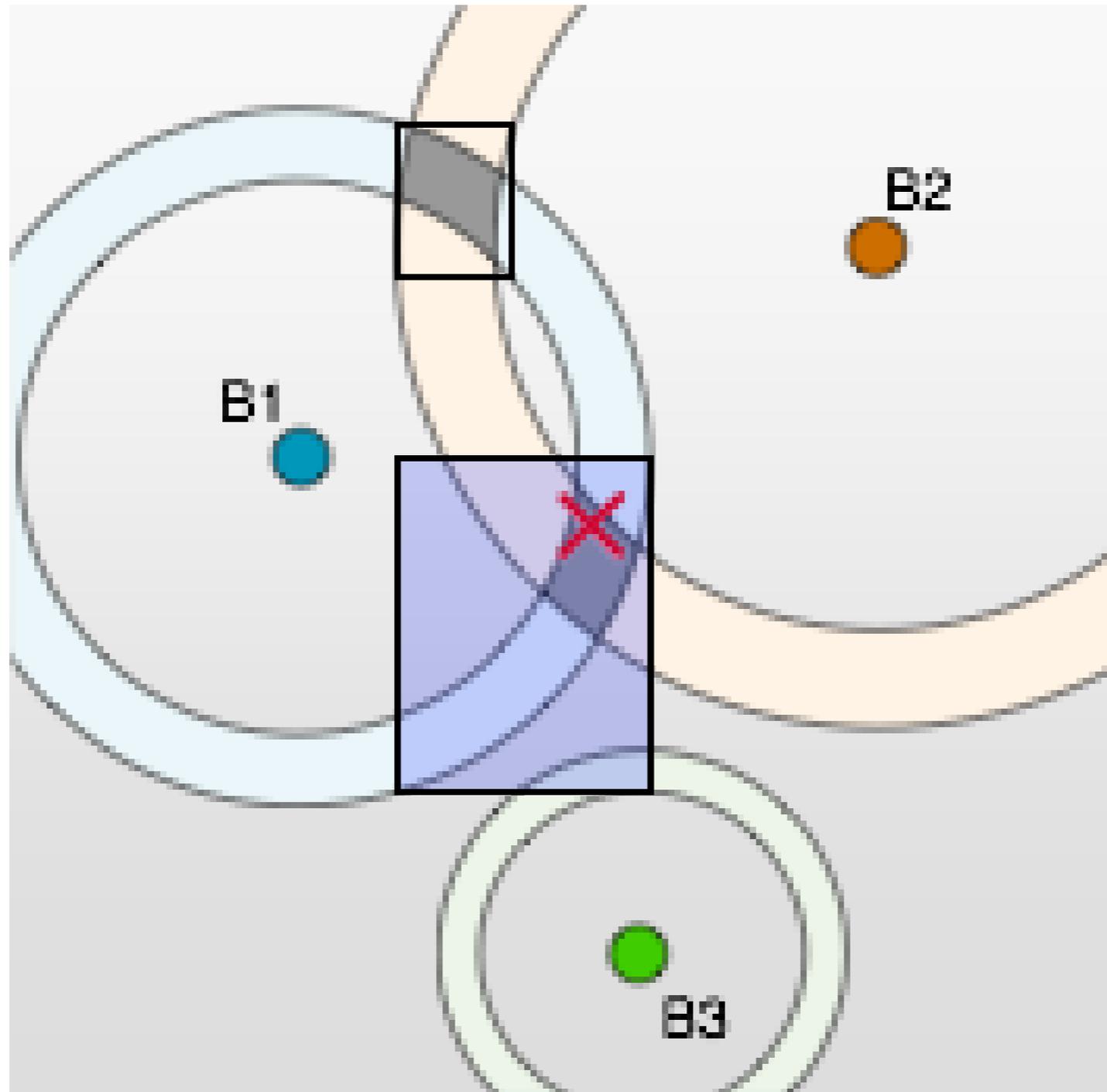


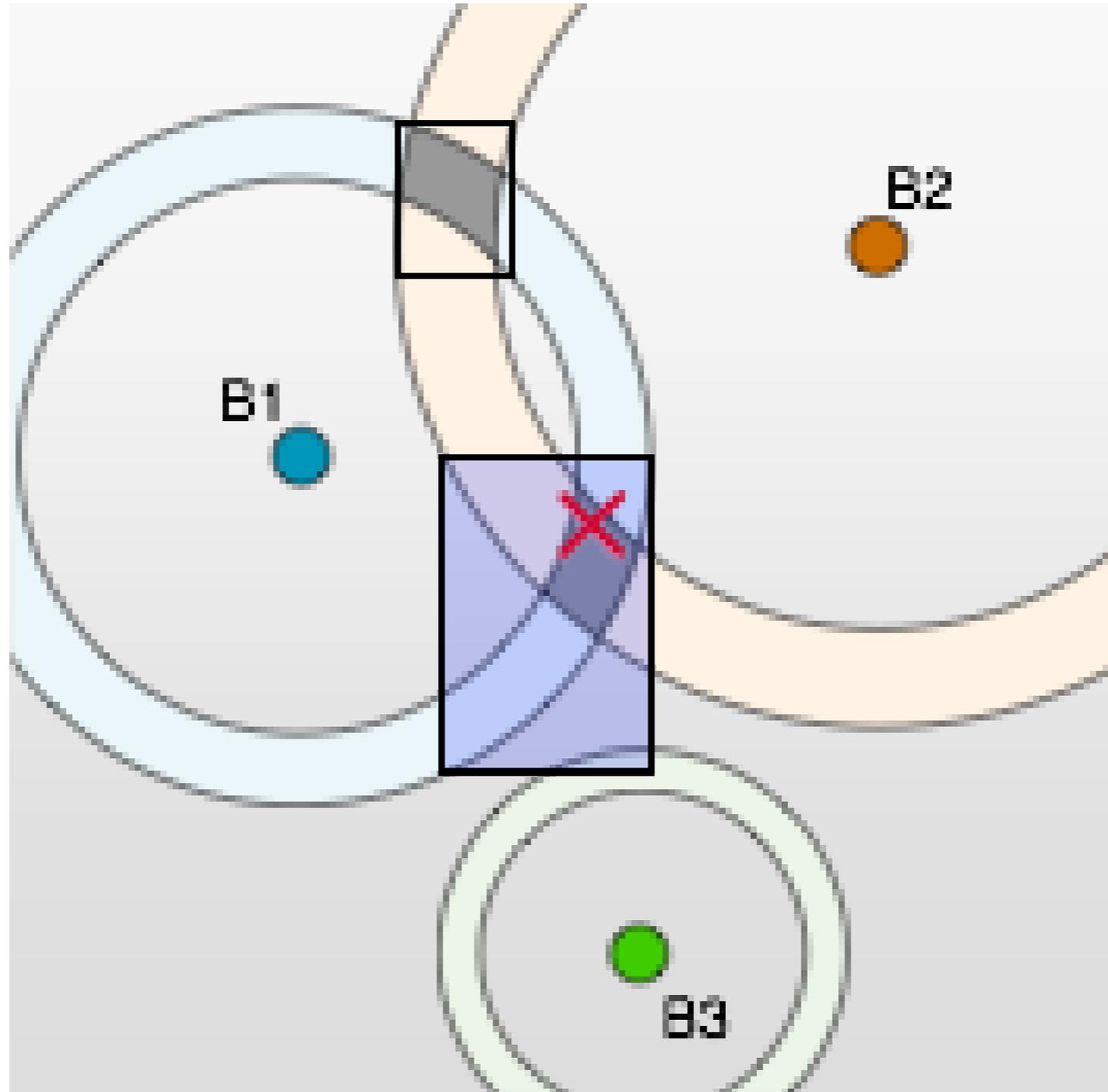
Boîte initiale (arbitrairement grande)

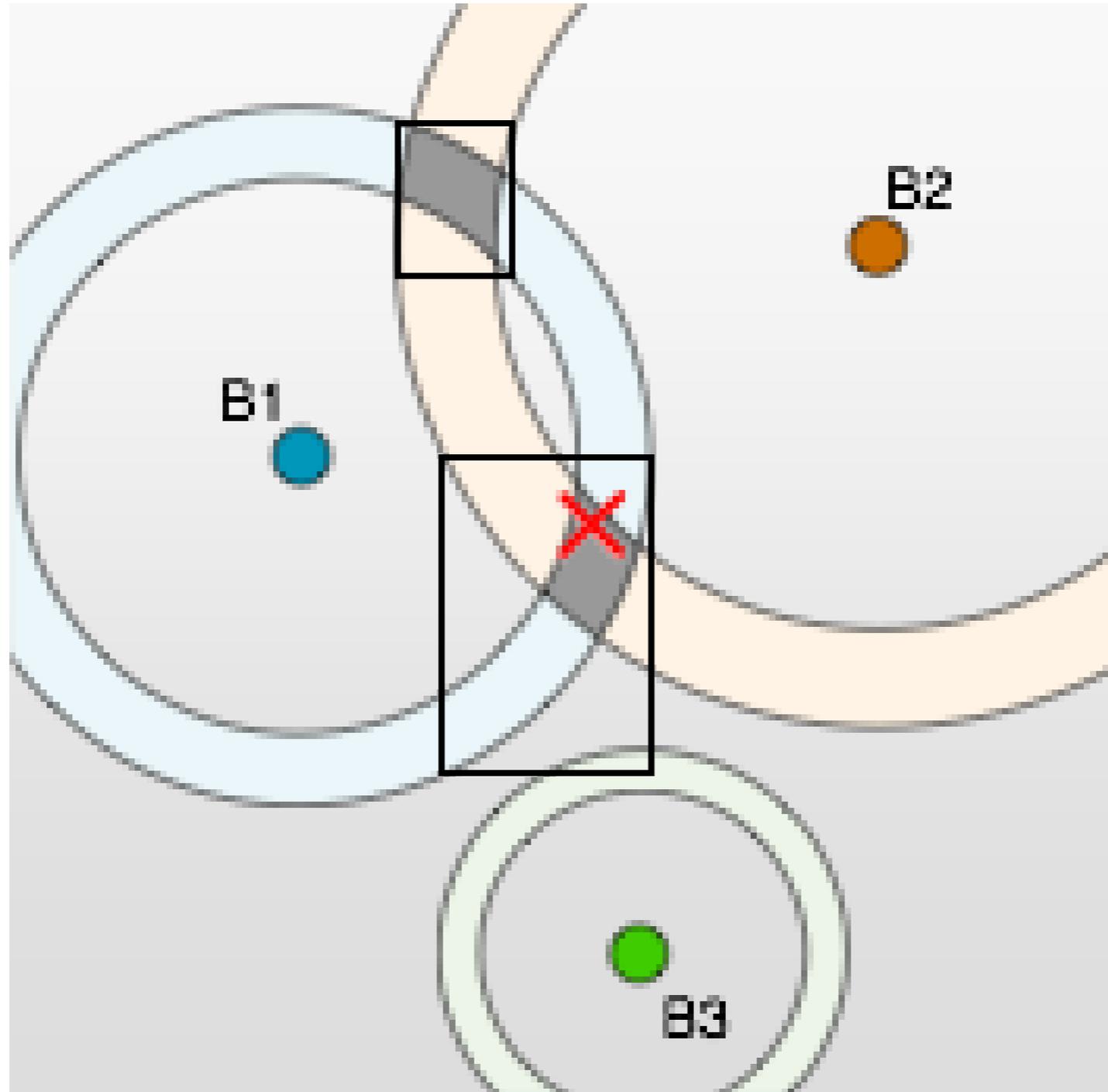


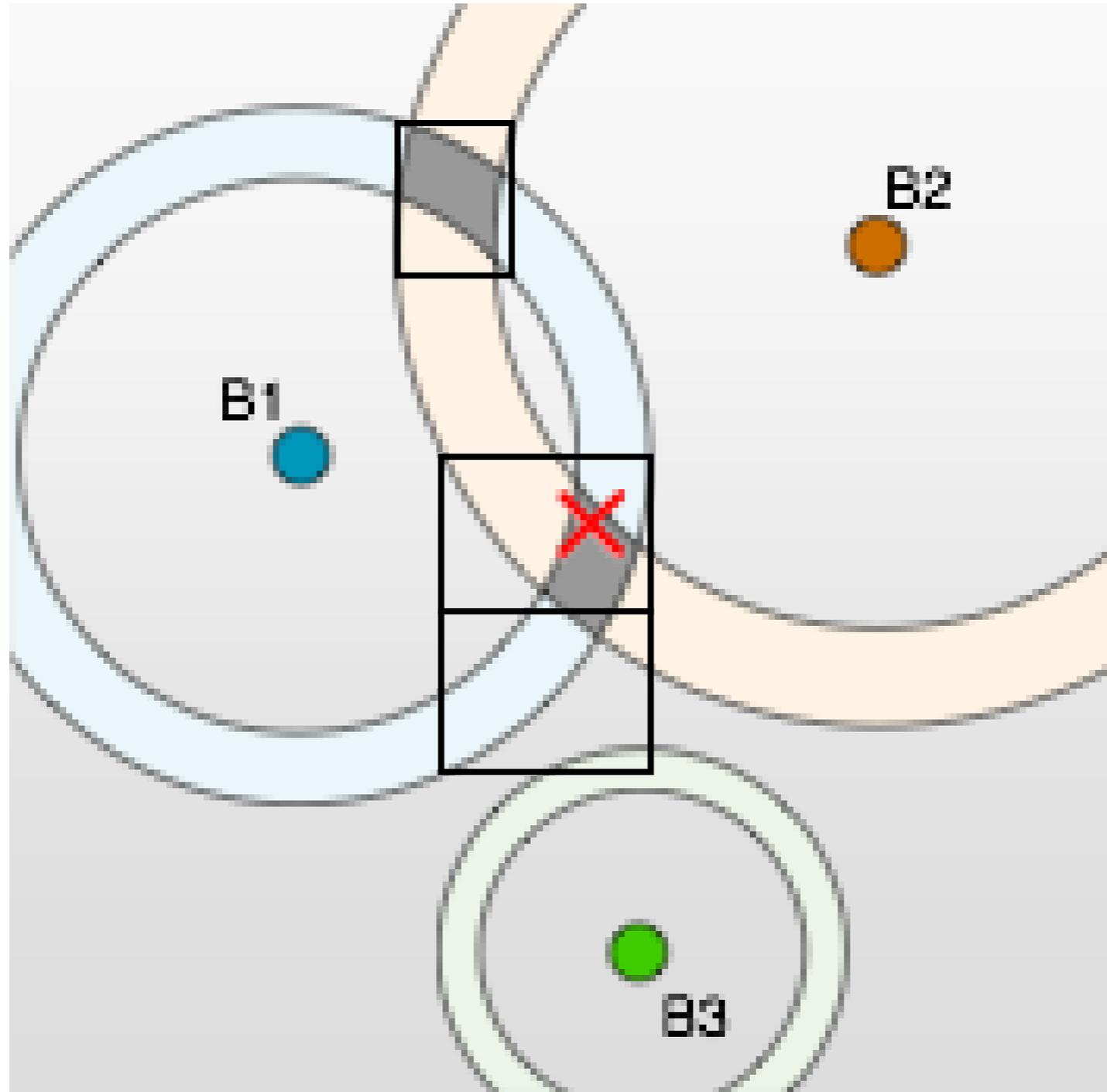


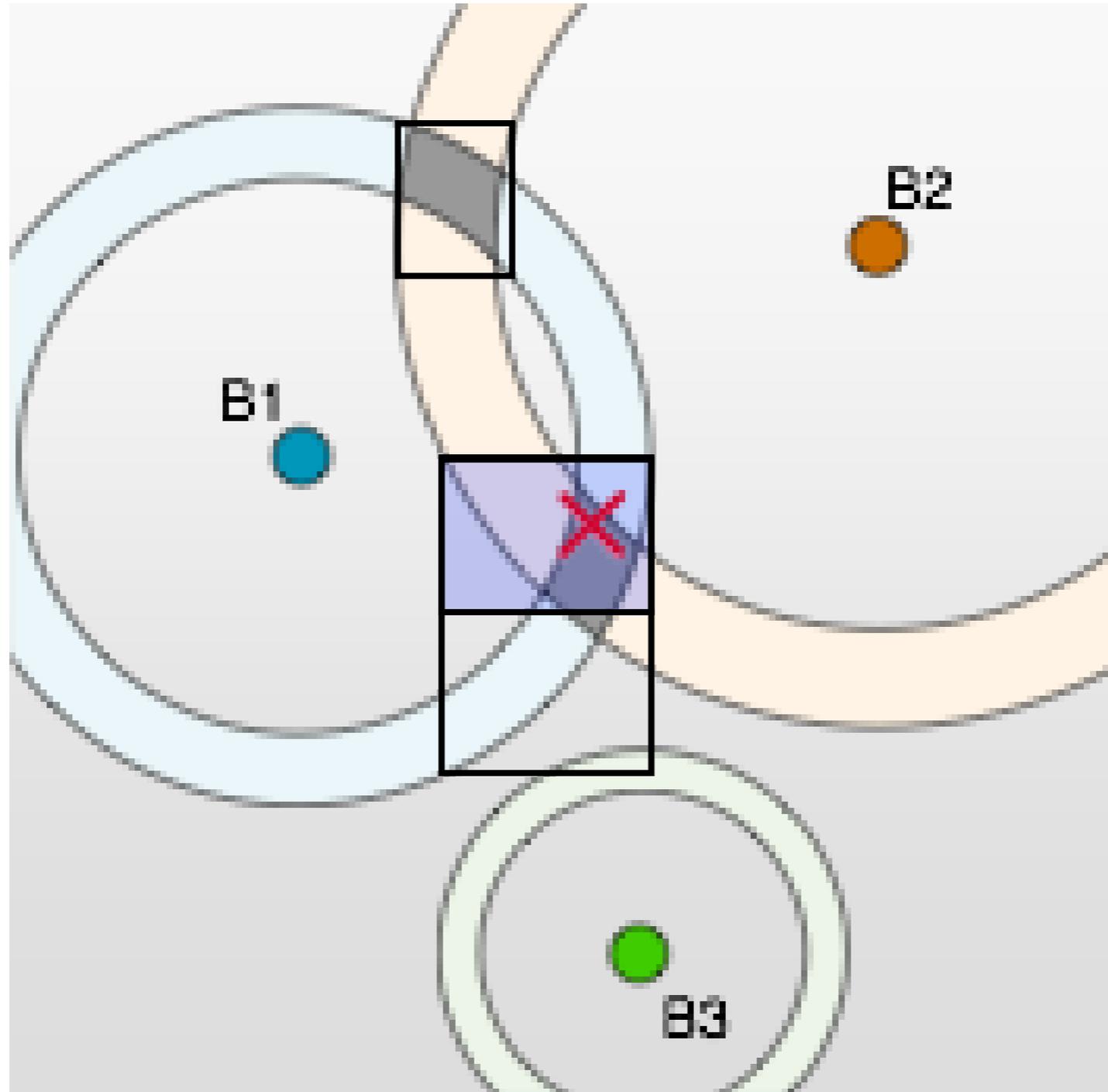


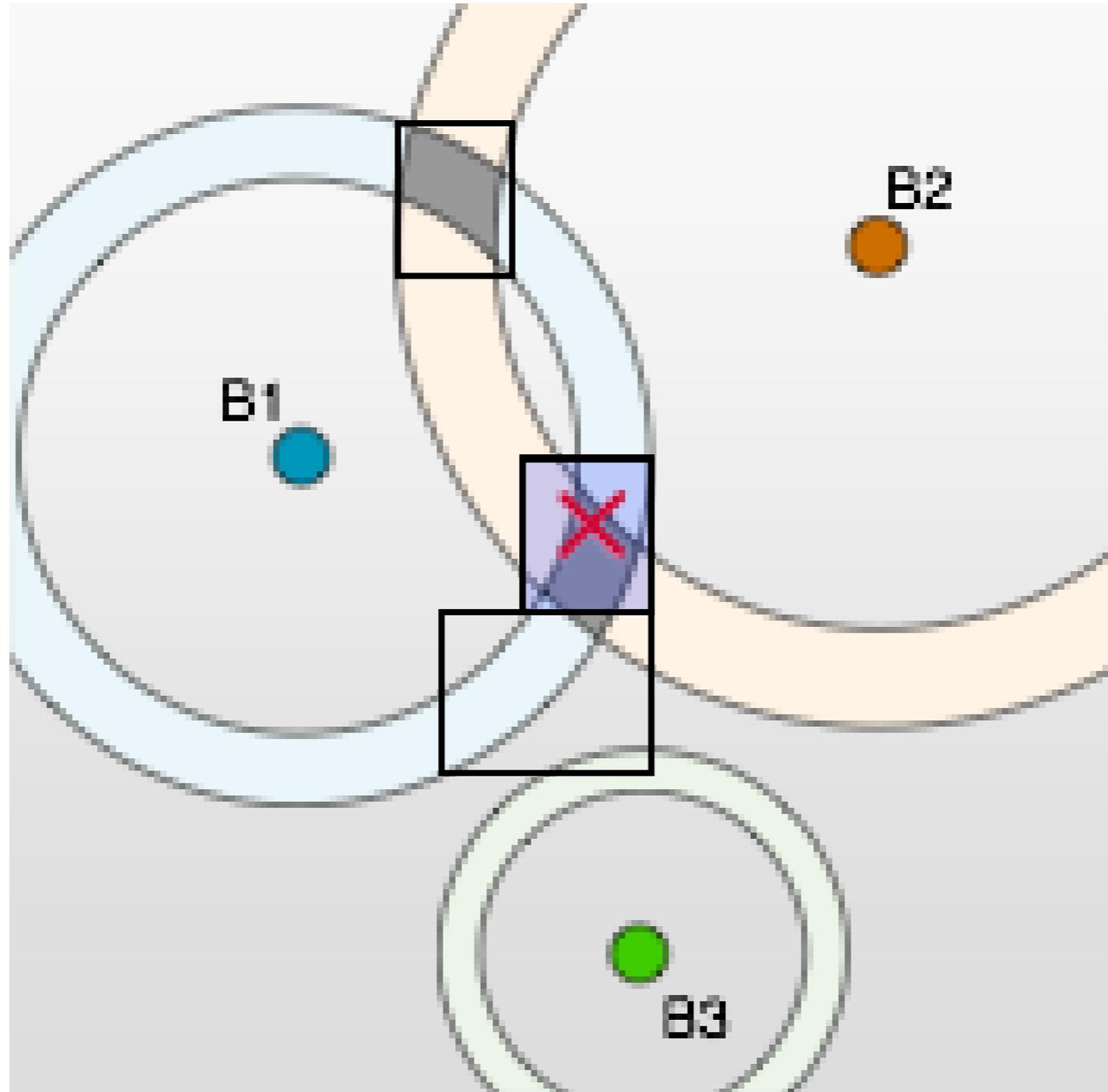


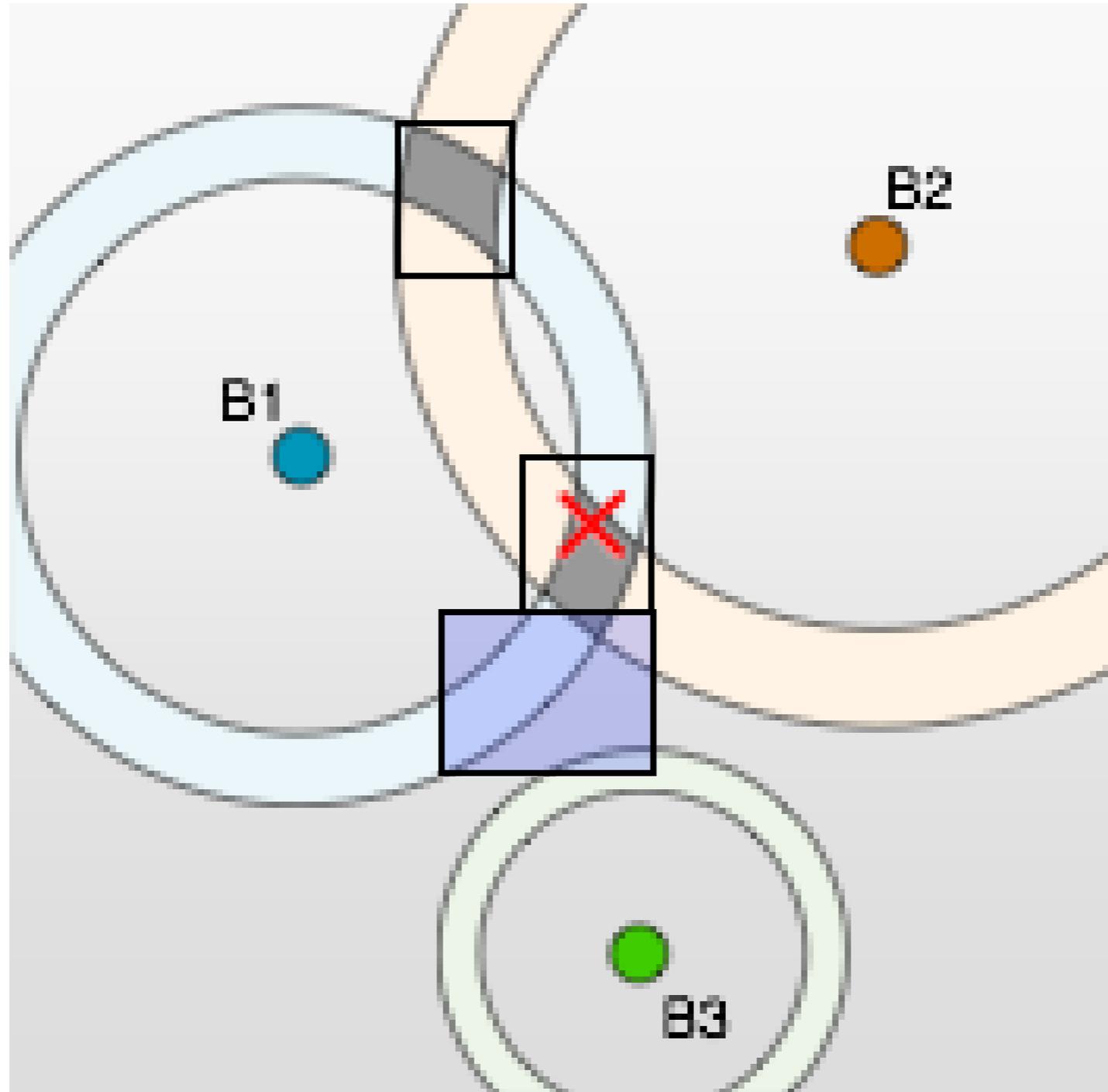


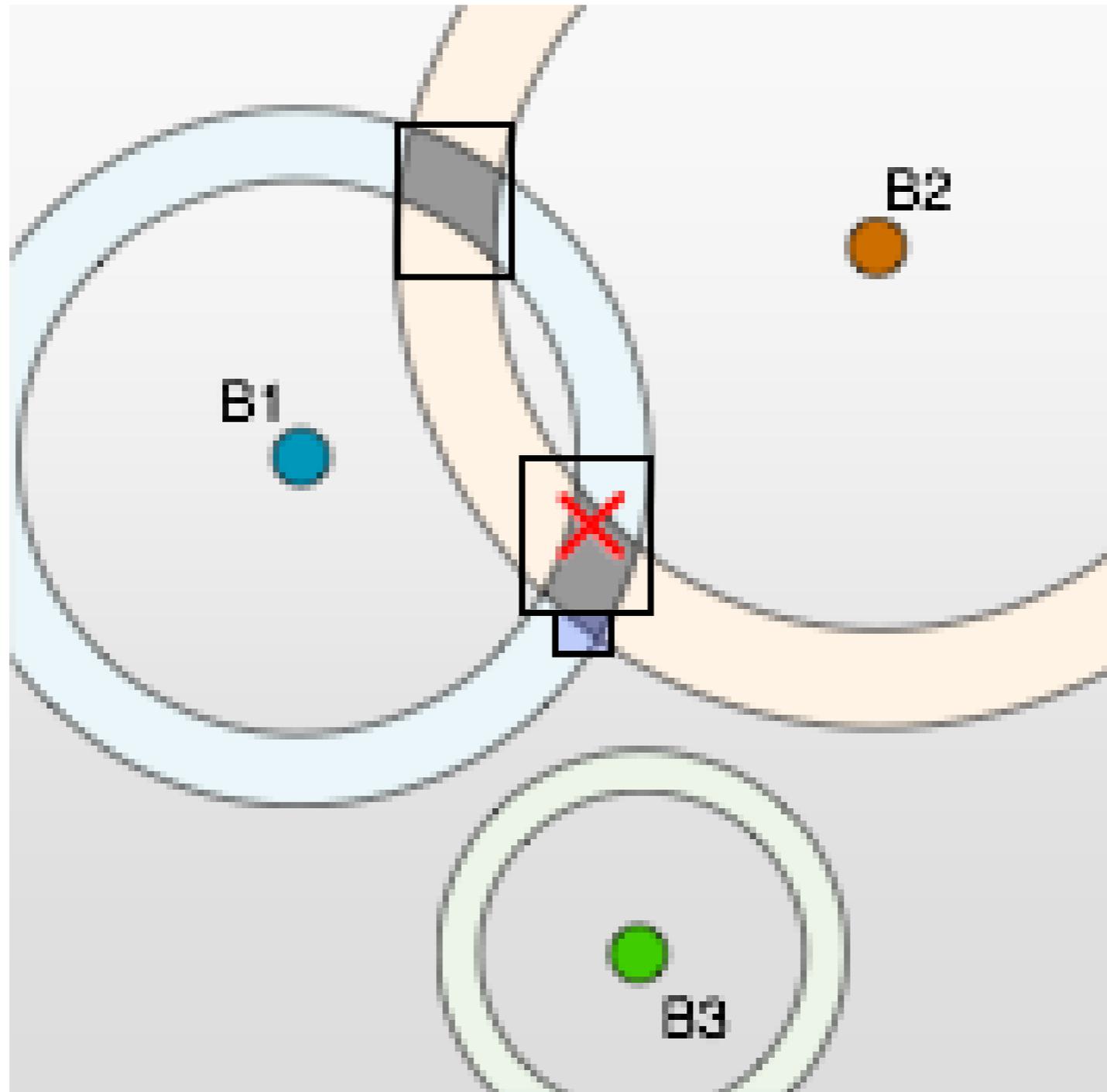


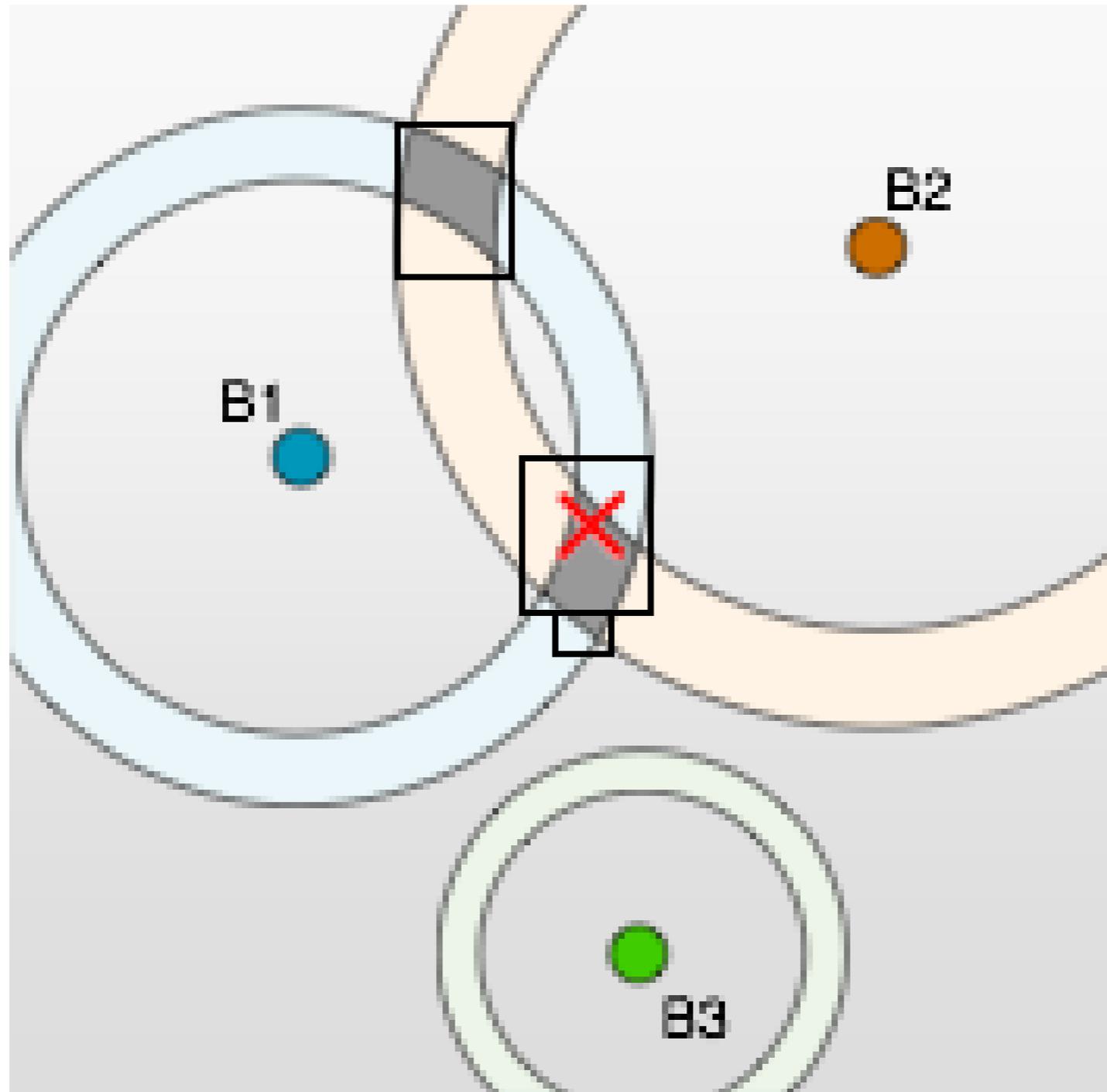


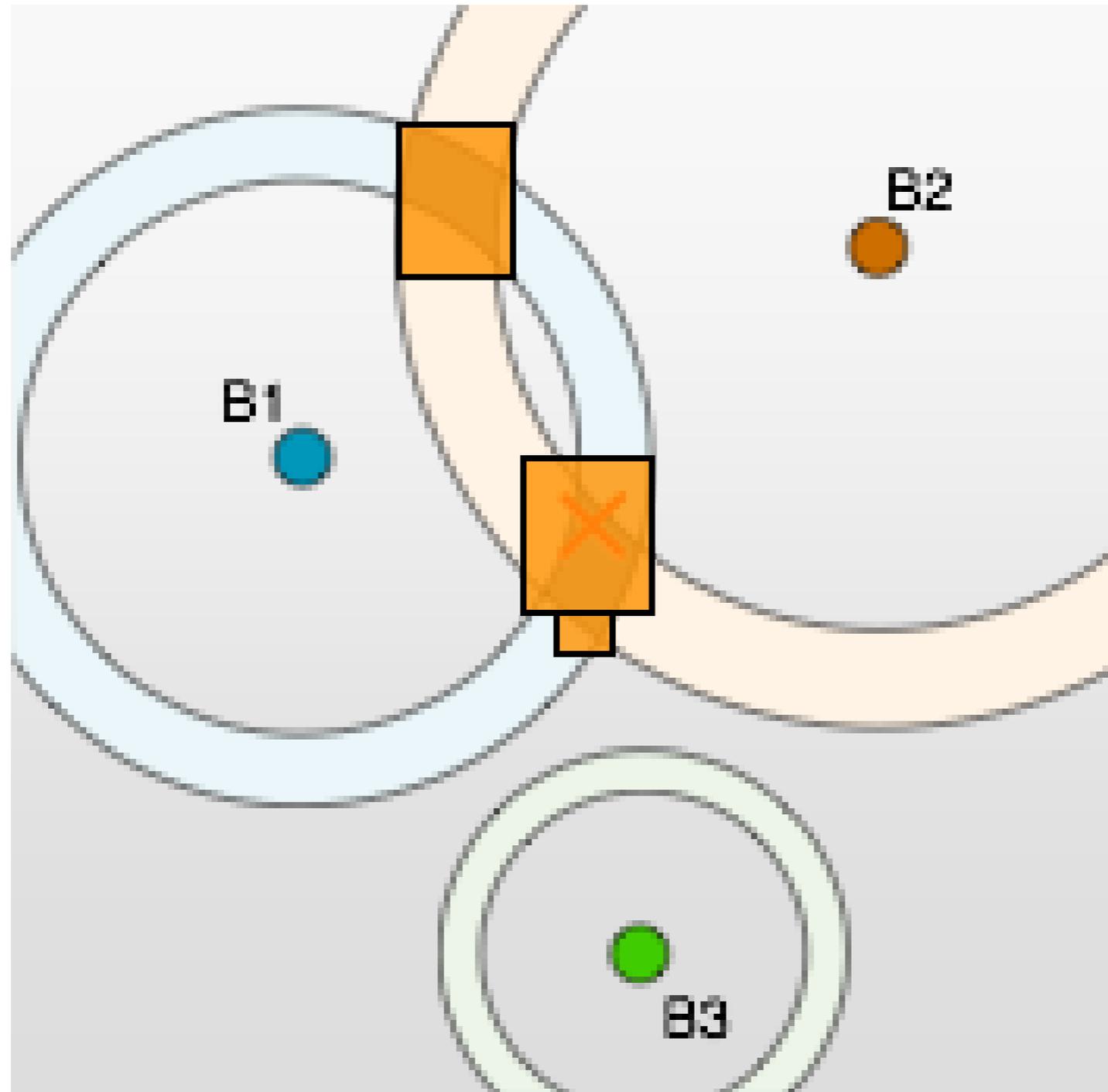






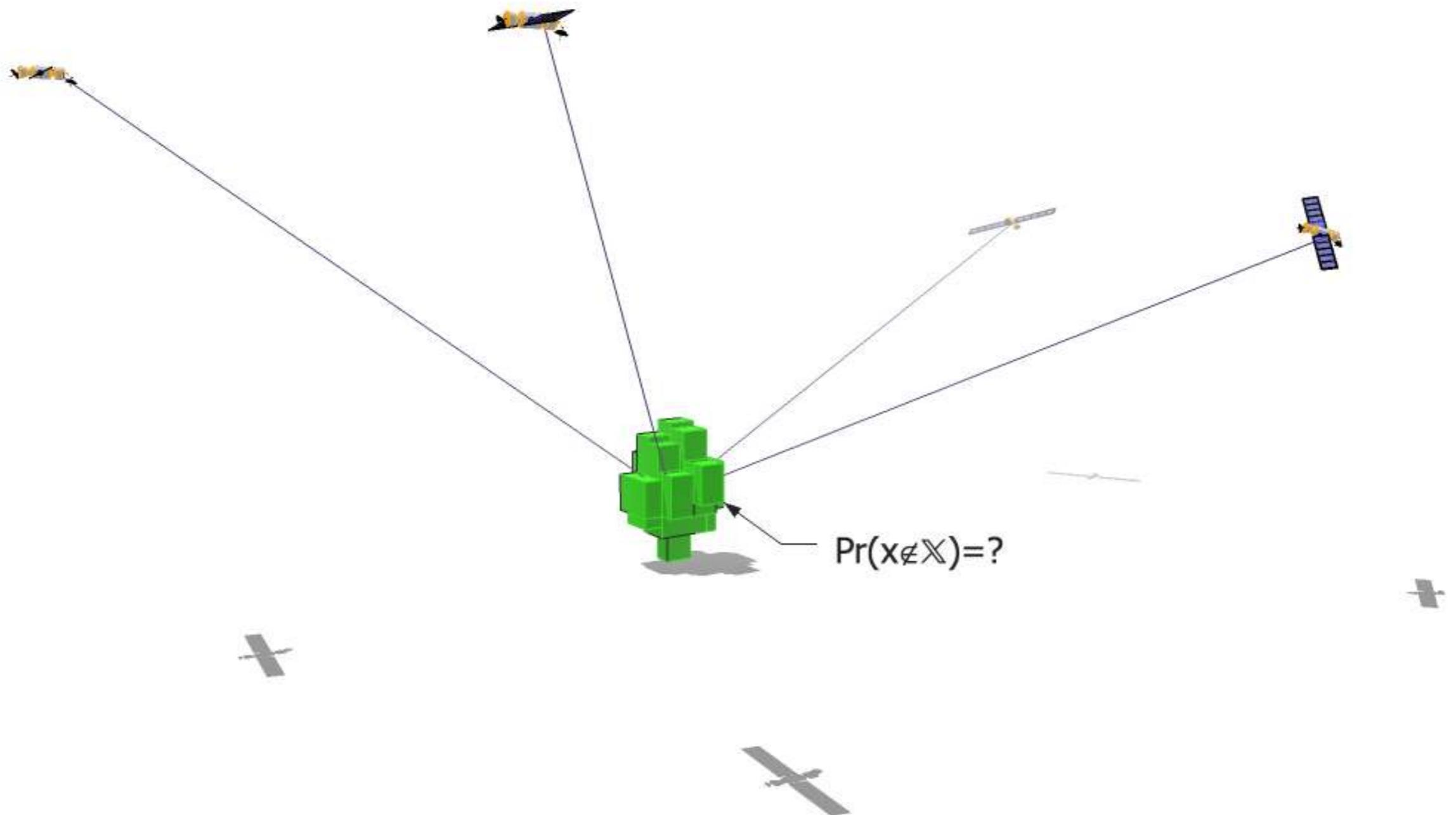






Calcul du risque

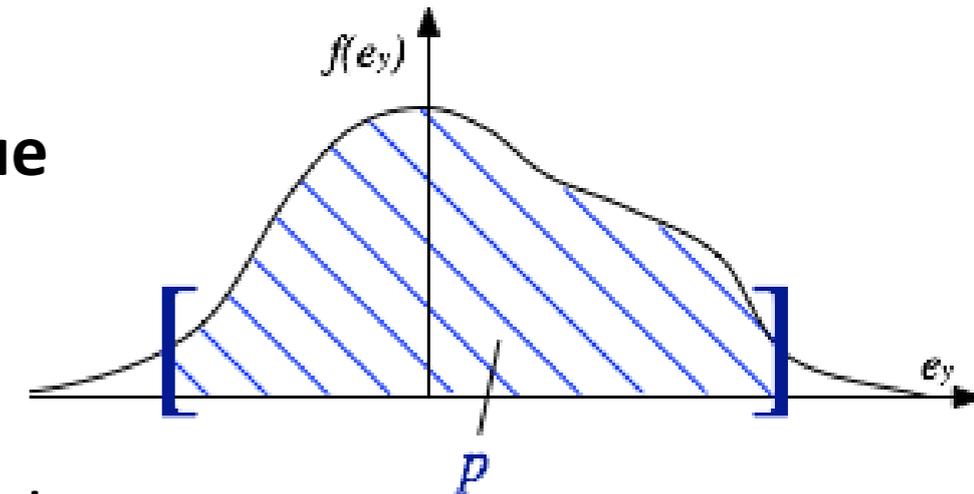
On cherche le risque associé *a priori* à la solution de localisation



Calcul du risque

À chaque intervalle de mesure correspond un risque

Hypothèse d'indépendance des bruits de mesure



$$\Pr(n_{ok} = k) = \binom{m}{k} p^k (1 - p)^{m-k}$$

nombre de mesures

proba d'appartenance d'une mesure à l'intervalle support

Borne du risque de non appartenance de la vraie position à la solution

$$r \leq 1 - \sum_{k=m-q}^m \binom{m}{k} p^k (1 - p)^{m-k}$$

[Jaulin 2011] Set-membership localization with probabilistic errors

Calcul des bornes pour un risque donné

Le risque r est spécifié, on peut déterminer p en inversant l'équation

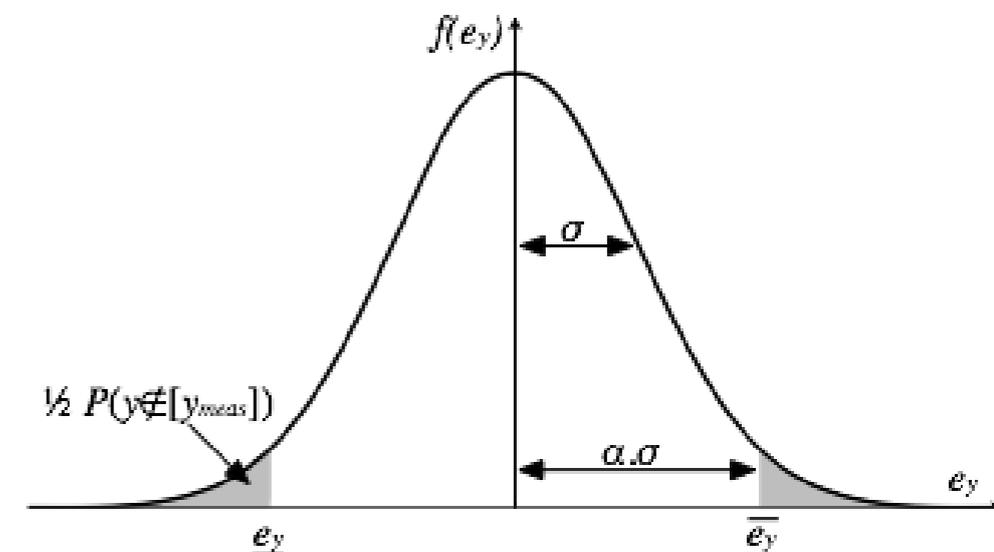
$$r_{max} = 1 - \sum_{k=m-q}^m \binom{m}{k} p^k (1-p)^{m-k}$$

Si on connaît la distribution de l'erreur, on peut déterminer des bornes

- exemple dans le cas Gaussien

$$\alpha = -\Phi^{-1} \left(\frac{1-p}{2} \right)$$

$$[y_{meas}] = [y_{meas} - \alpha\sigma_y, y_{meas} + \alpha\sigma_y]$$



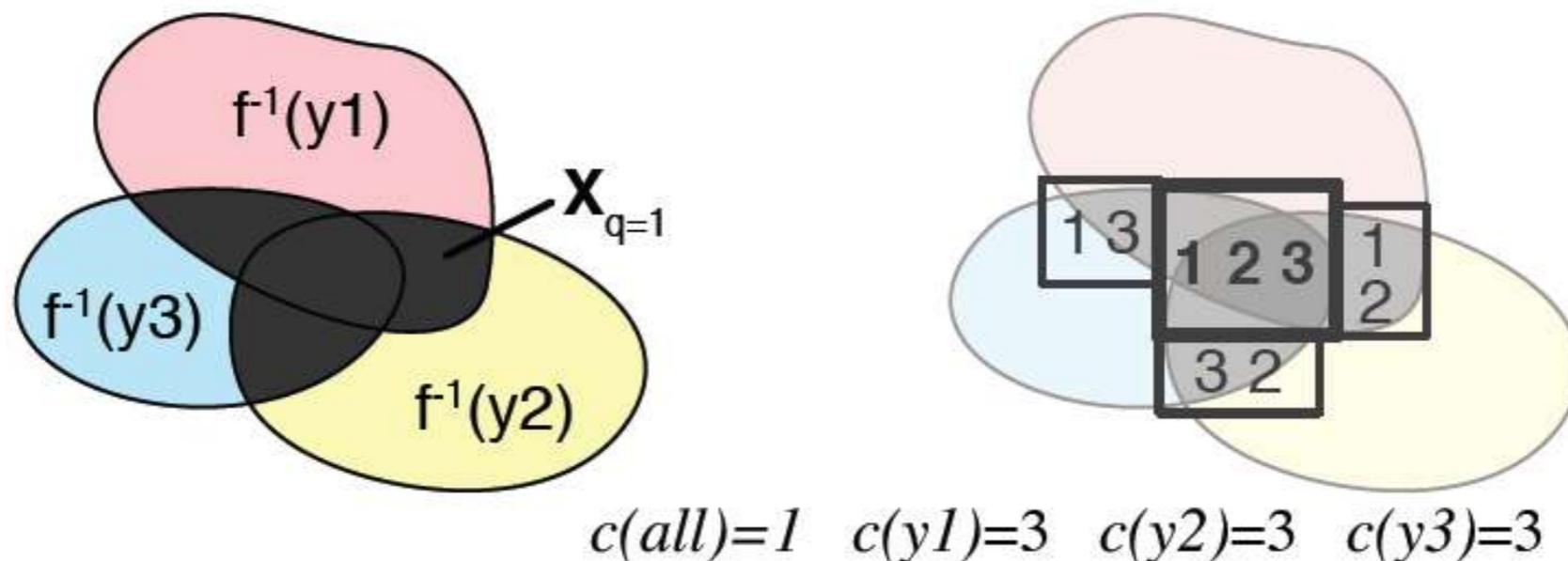
En GPS, le système fournit des variances de gaussiennes englobantes

Détection et identification de défaut

On utilise des compteurs afin de connaître le nombre de boîtes compatibles avec chaque mesure.

Pas de faute

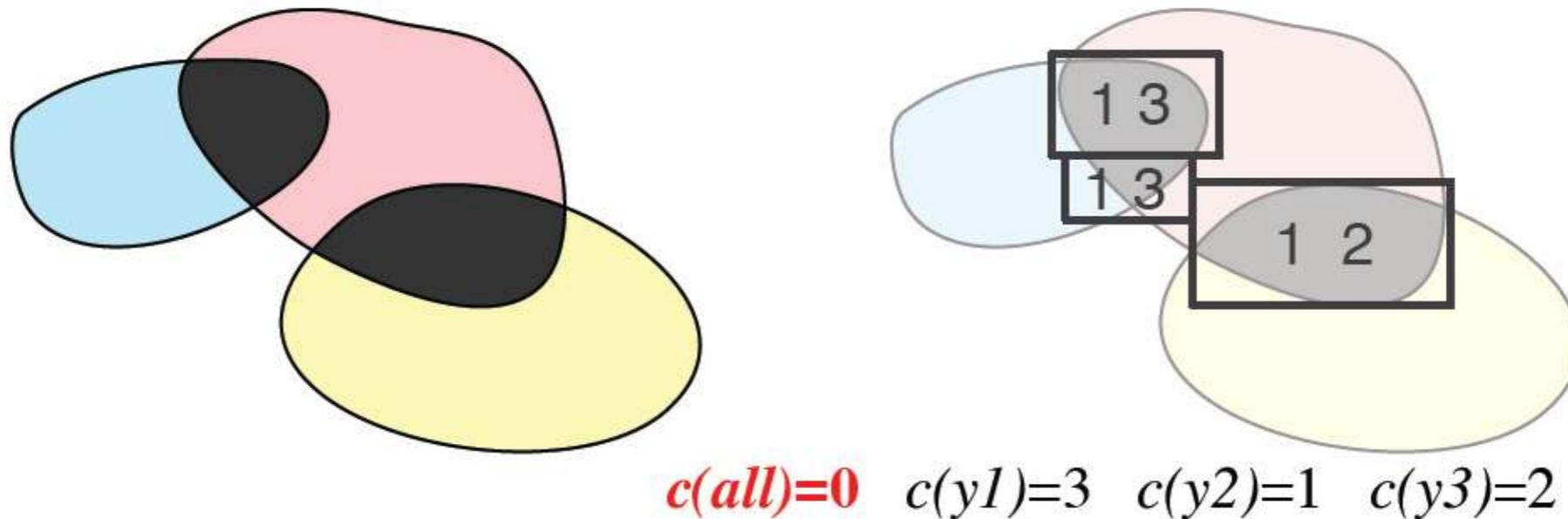
On ne détecte pas de faute si au moins une boîte de la solution est compatible avec toutes les mesures



Détection et identification de défaut

Détection de faute

La présence d'une faute est détectée quand le sous pavage solution ne contient pas de pavé satisfaisant toutes les contraintes

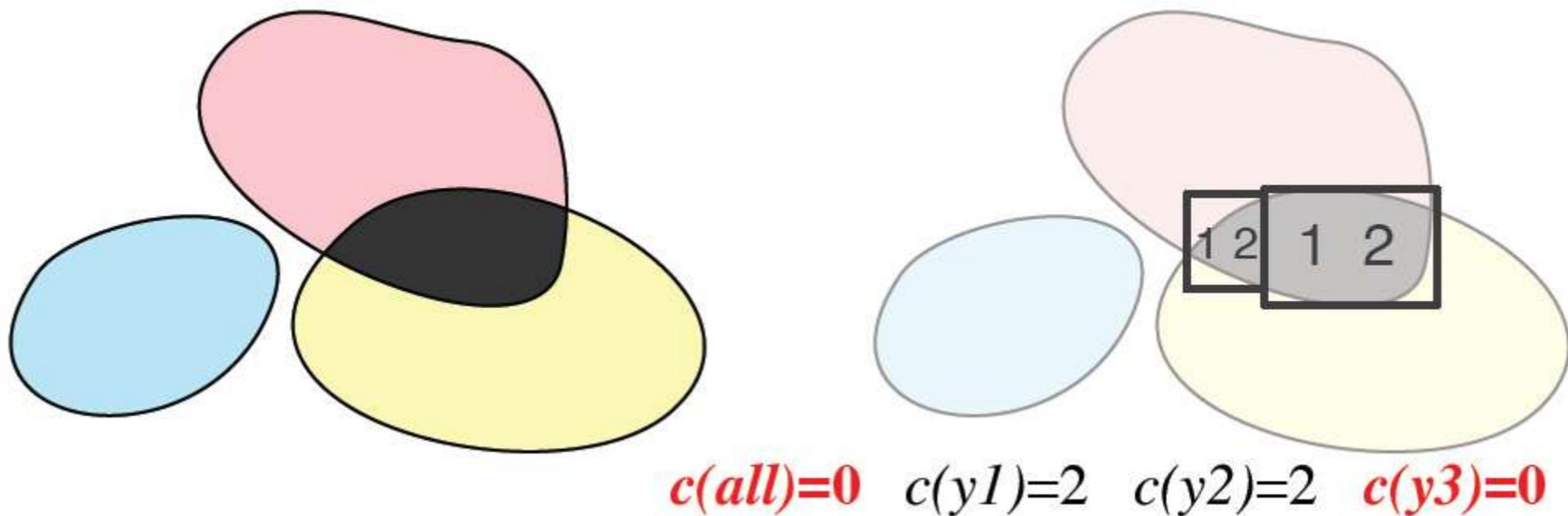


Détection et identification de défaut

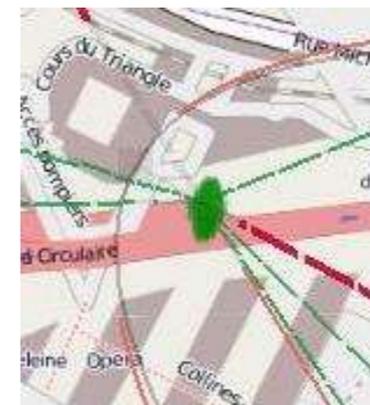
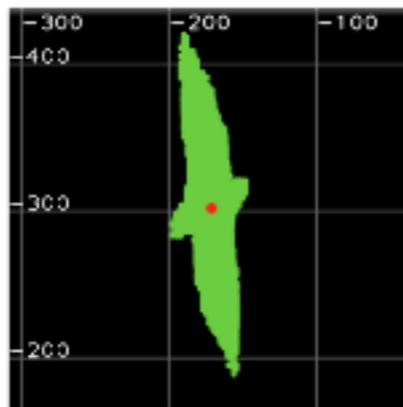
Identification d'un défaut

Quand aucune boîte du sous pavage n'est compatible avec une mesure, cette dernière est identifiée comme aberrante.

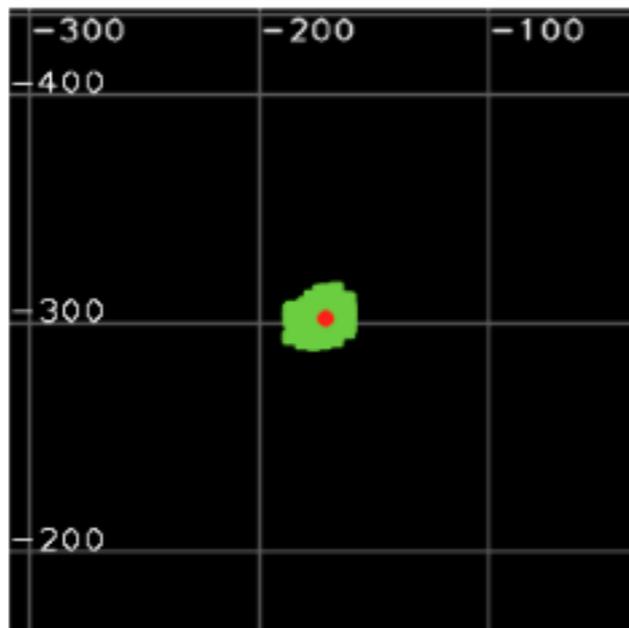
Elle est implicitement exclue de la solution.



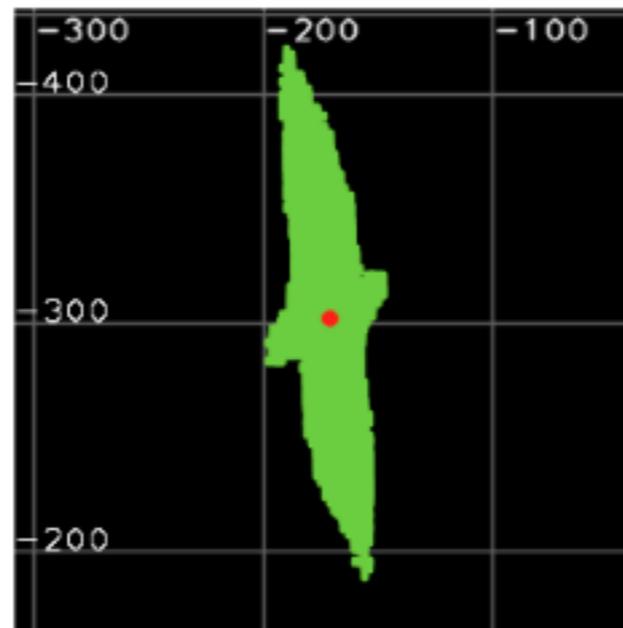
Résultats



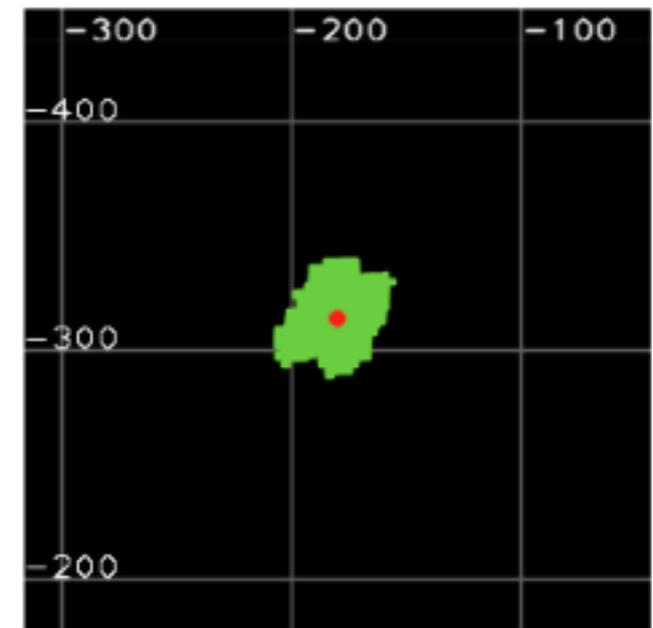
Le MNT réduit l'incertitude de la localisation robuste



non robuste
GPS seul

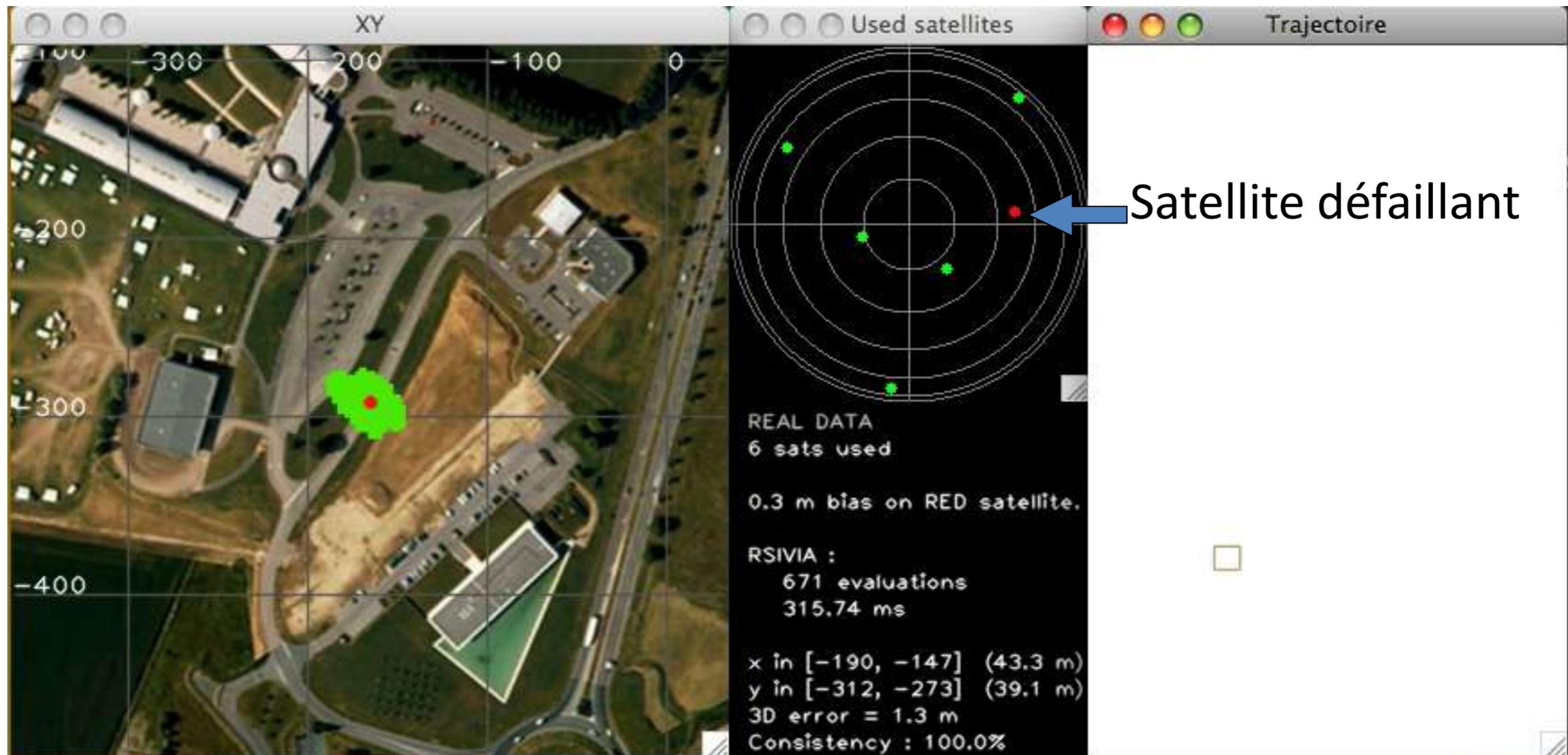


robuste 1-relaxée
GPS seul



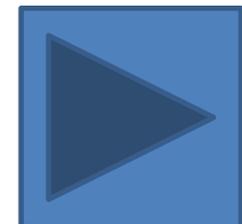
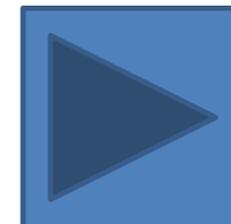
robuste 1-relaxée
GPS + MNT

Résultats à Compiègne : robustesse



Solution de l'inversion ensembliste 1-relaxée. GPS + MNT

On simule la dérive de l'horloge du satellite rouge

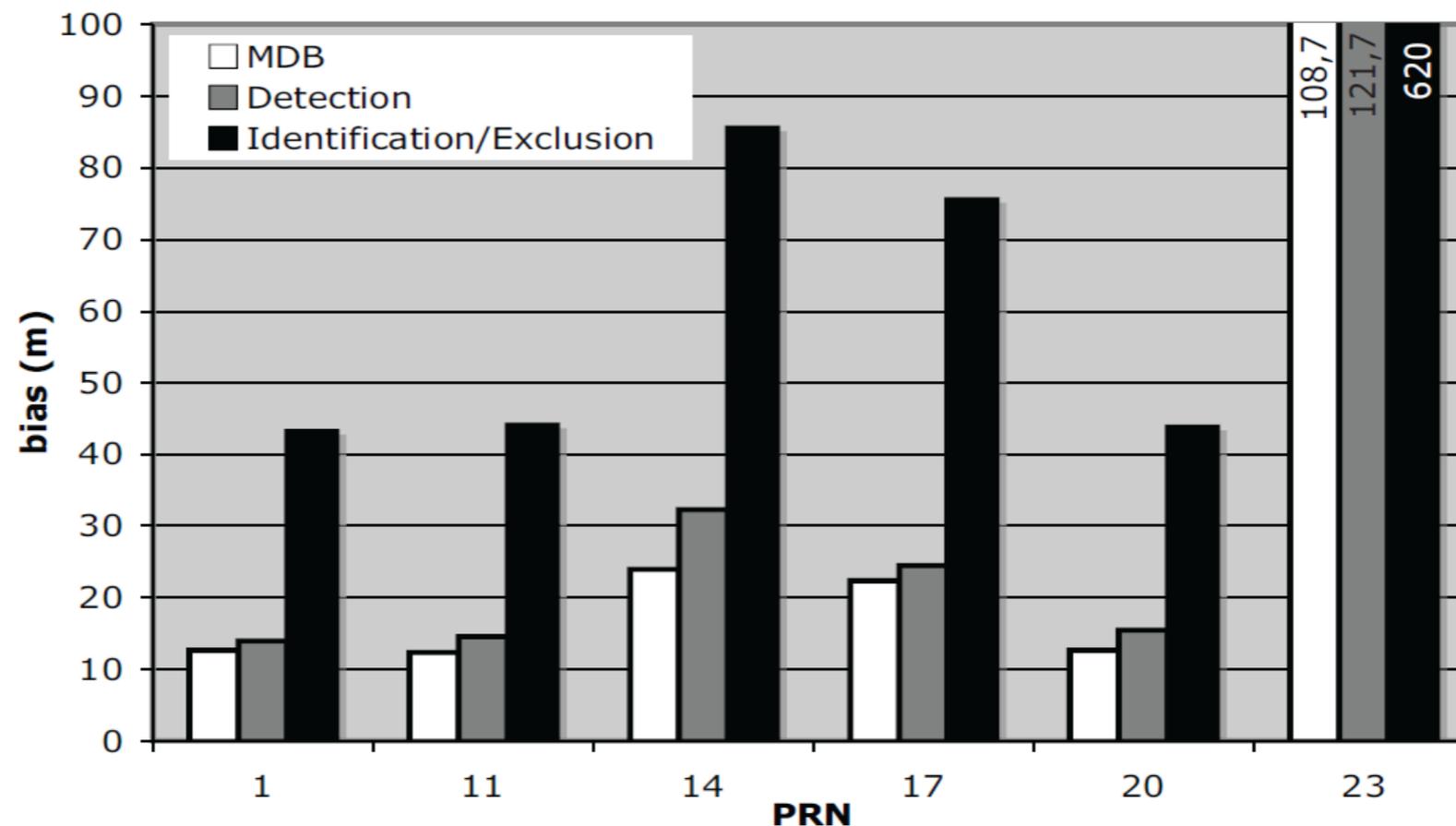
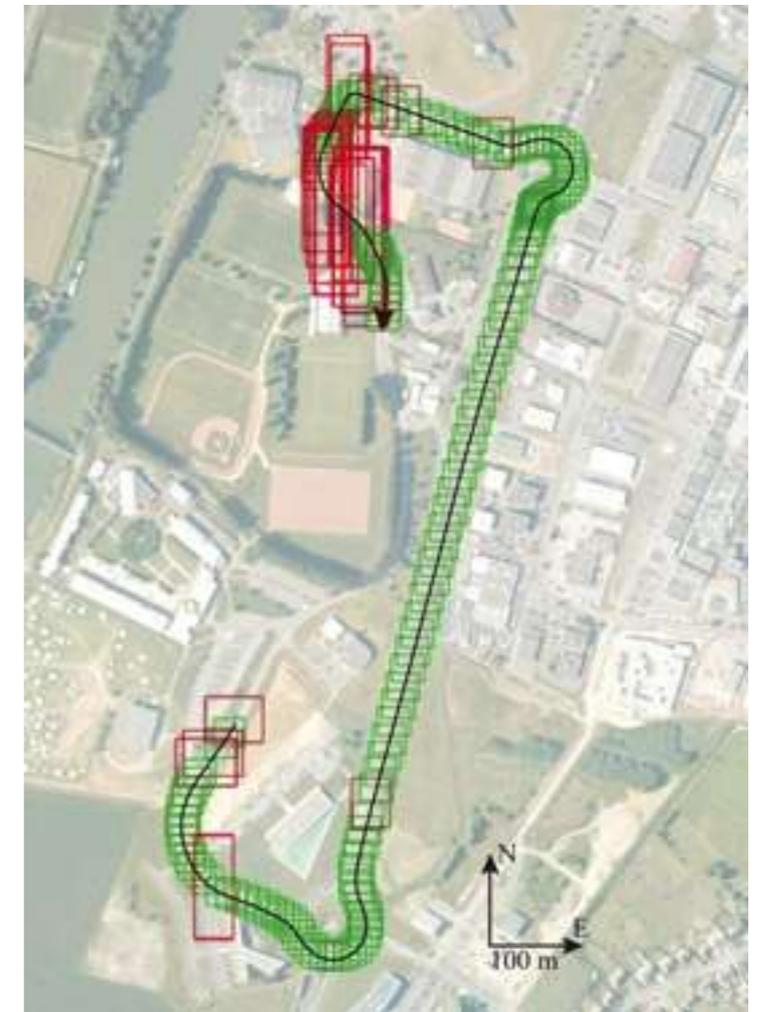


Détection de défaut

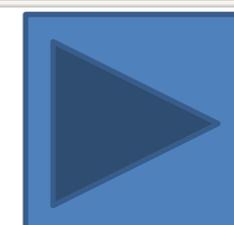
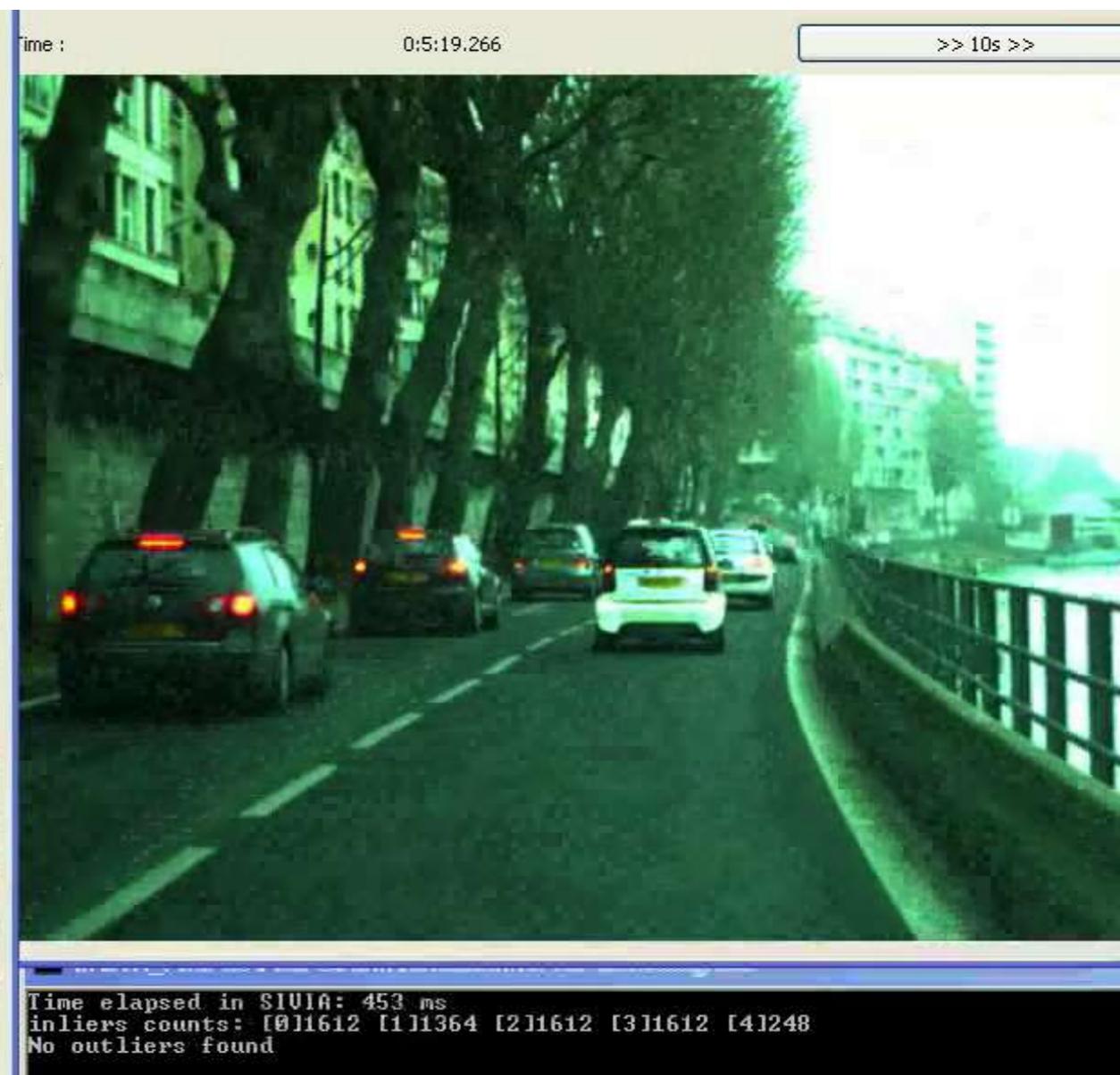
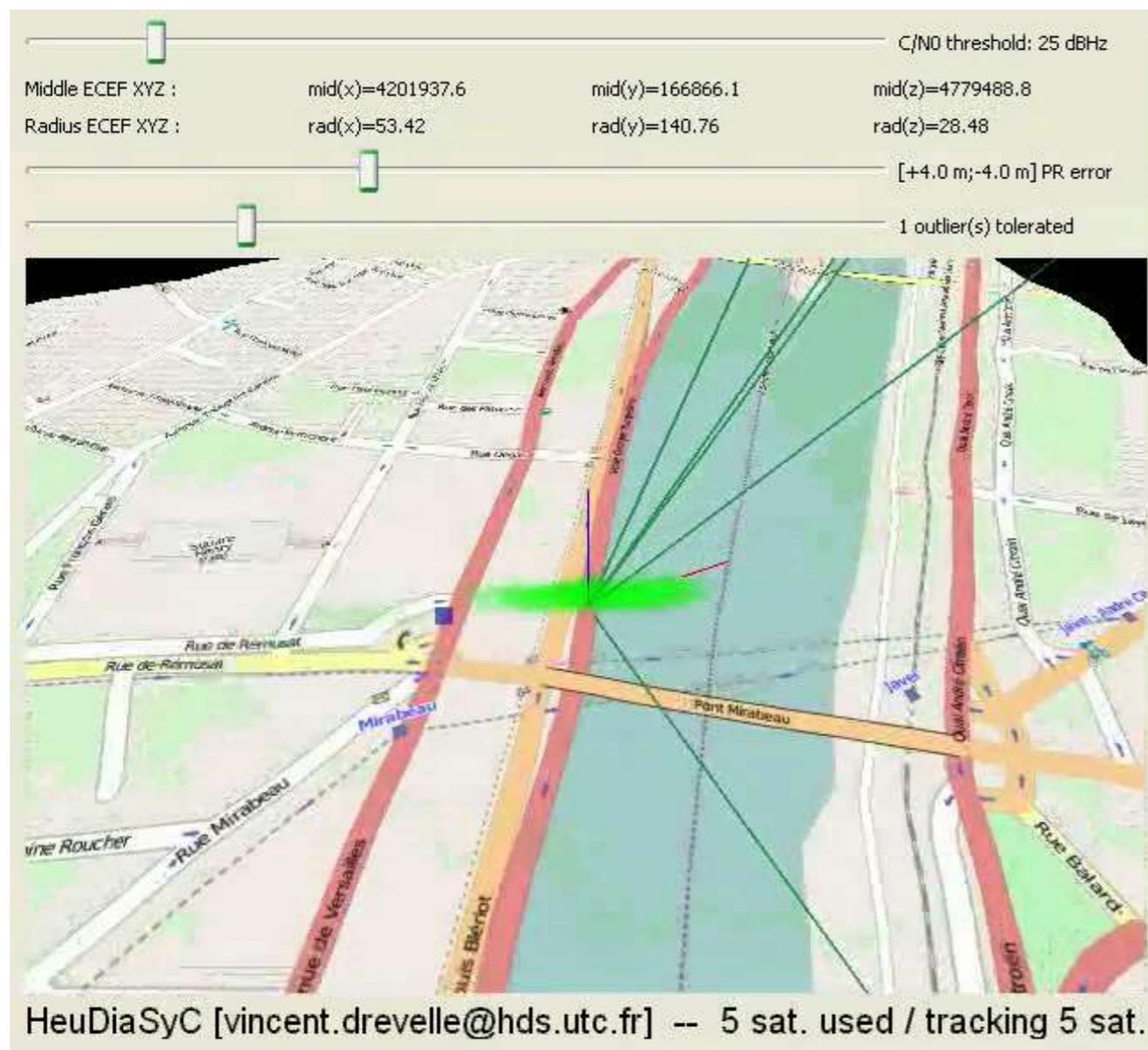
Comparaison avec l'approche standard

Données réelles avec injection d'un défaut sur un satellite.

La taille des défauts détectés est cohérente avec le MDB



Essai de la méthode avec de vrais multitrajets



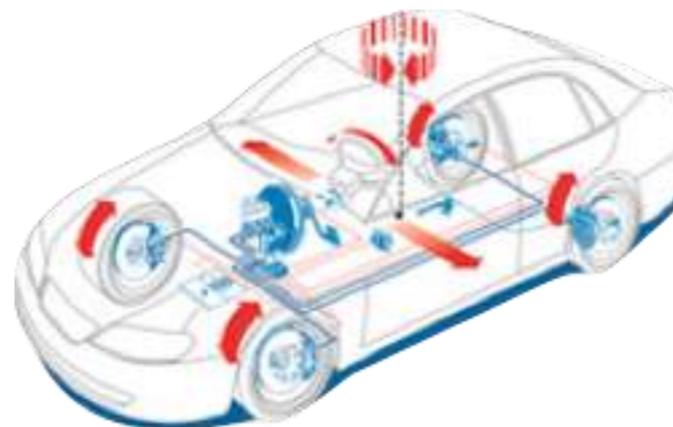
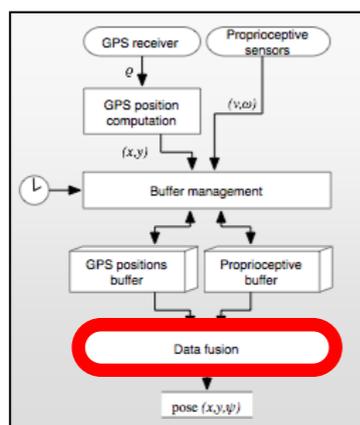
Essai avec un récepteur bas coût *uBlox* à La Défense



Essai avec un récepteur bas coût *uBlox* à La Défense



Localisation dynamique à partir d'un historique de données

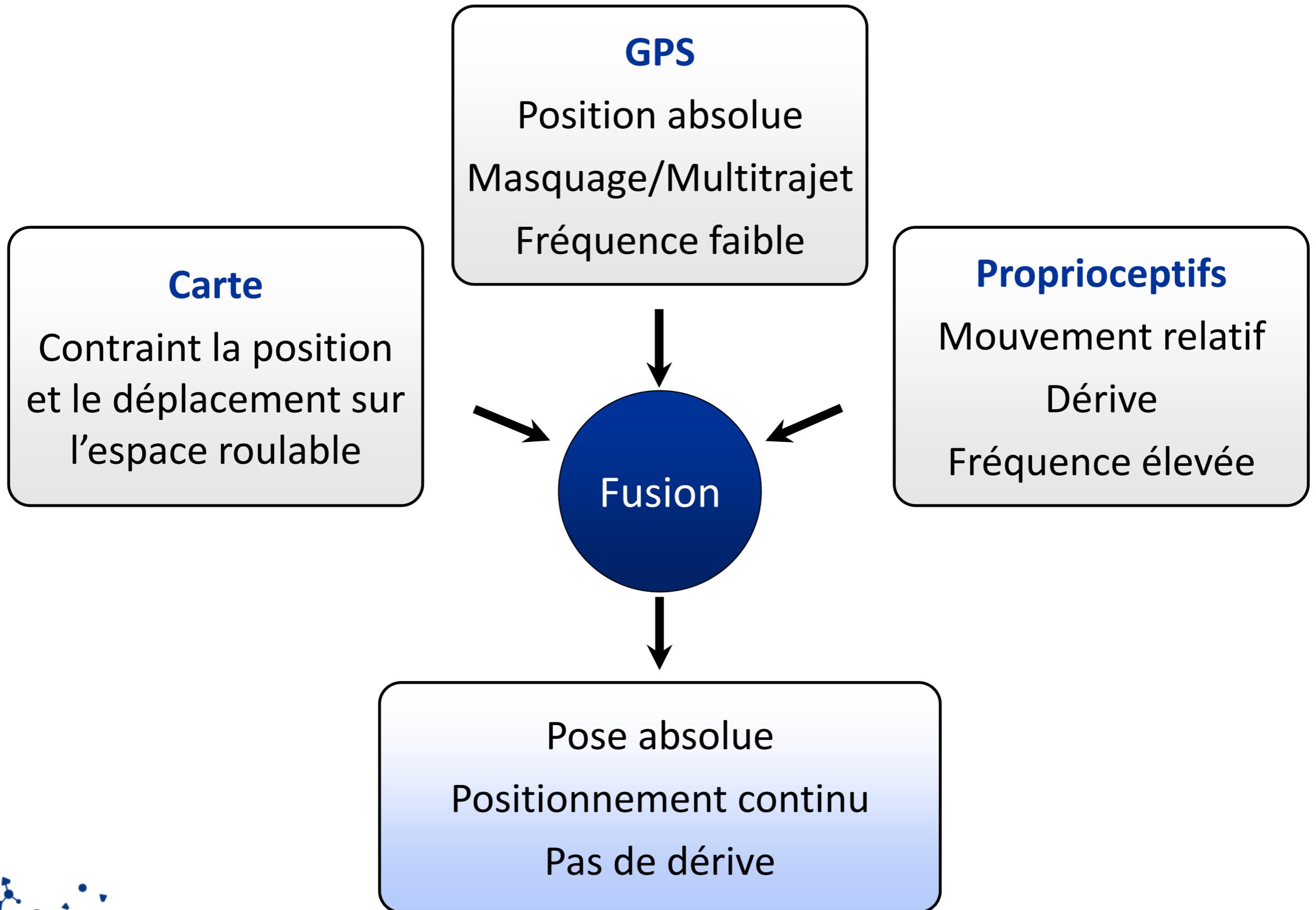


Canyon urbain : masquage et multitrajets

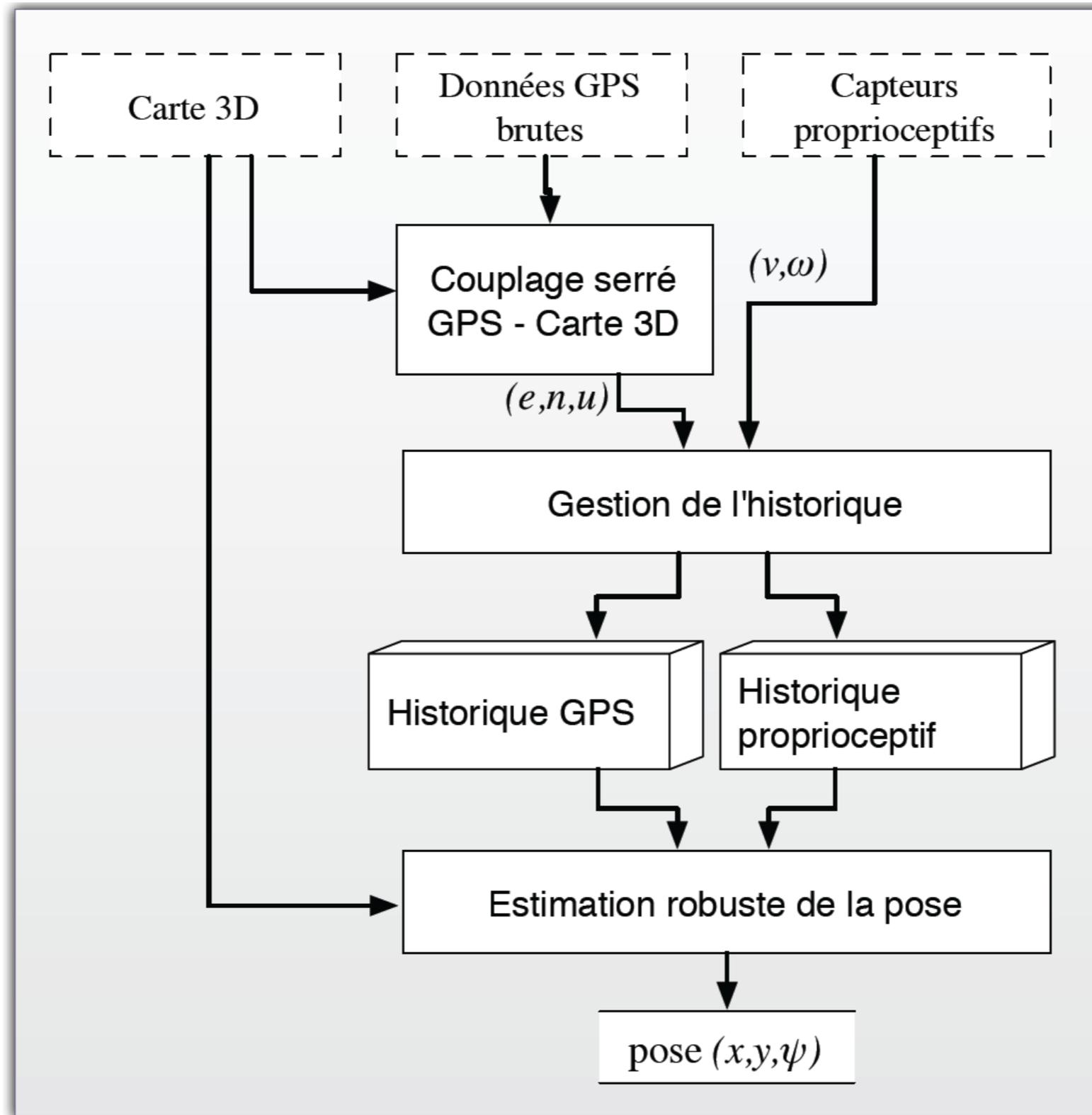


Tunnel : pas de signal





Localisation dynamique à partir d'un historique de données



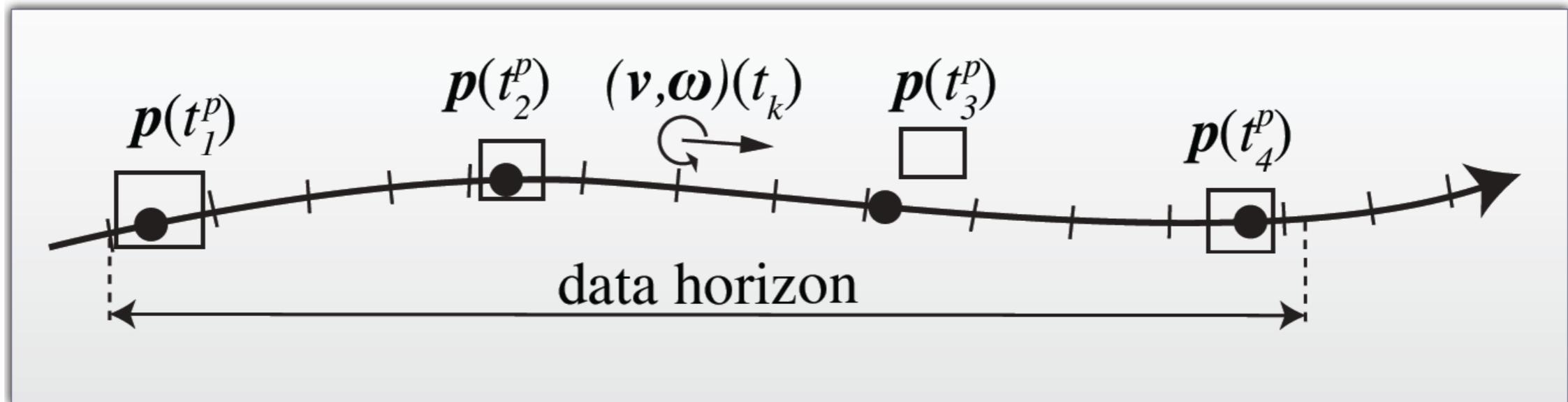
Horizon de données

On conserve

- Les positions (boîtes) -> contrainte q-relaxée
- Les mesures proprioceptives (intervalles) -> contrainte dure

Taille limitée

Les données sont datées et triées par date de valeur



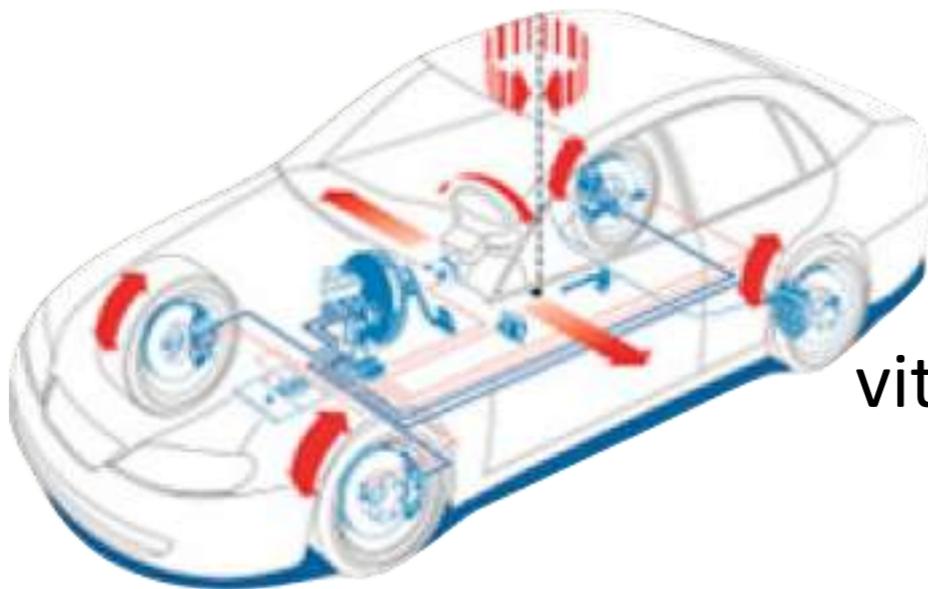
Observateur de pose (x,y,ψ)

$$x(t_{k+1}) = x(t_k) + (t_{k+1}-t_k) \cdot v_{odo}(t) \cdot \cos \psi(t_k)$$

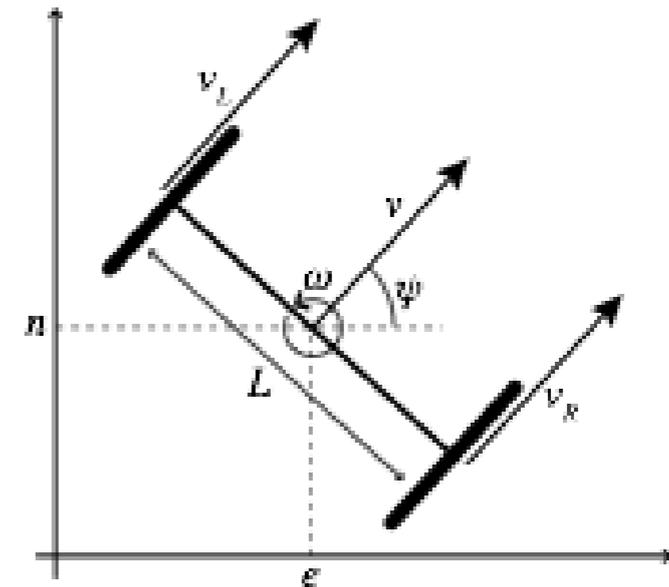
$$y(t_{k+1}) = y(t_k) + (t_{k+1}-t_k) \cdot v_{odo}(t) \cdot \sin \psi(t_k)$$

$$\psi(t_{k+1}) = \psi(t_k) + (t_{k+1}-t_k) \cdot \omega_{gyro}(t_k)$$

vitesse de lacet



vitesse des roues



Prédiction de la dérive d'horloge avec peu de satellites

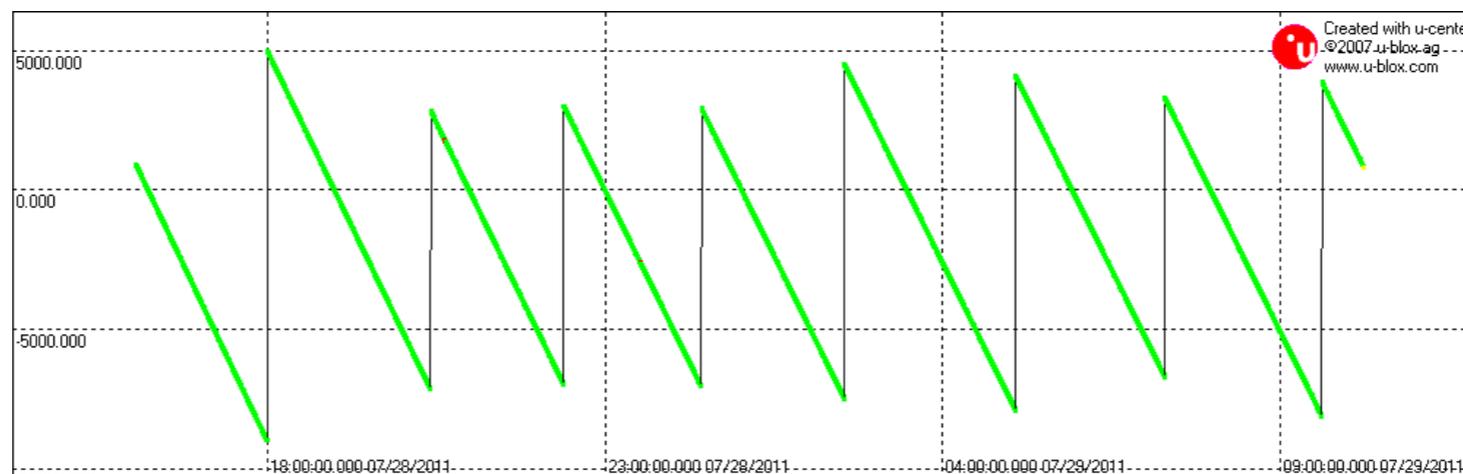
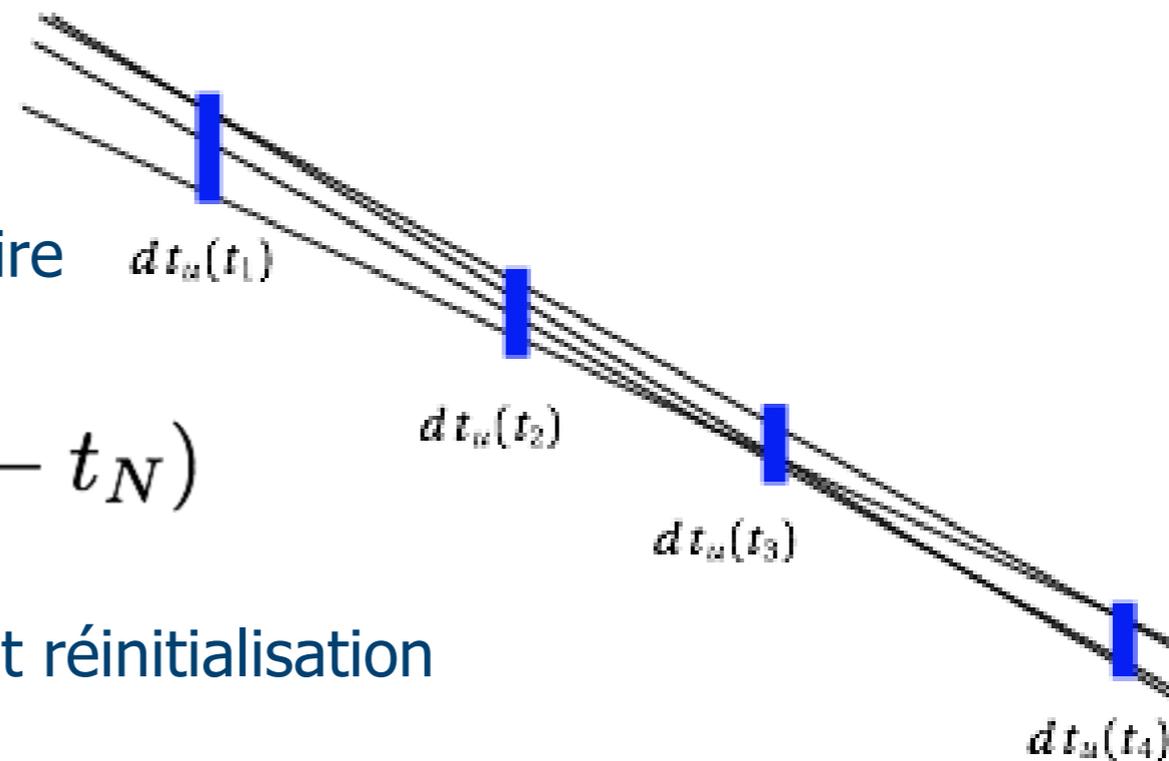
On mémorise le dt_u aux époques où il y a suffisamment de satellites

Le décalage d'horloge est prédit à partir de l'historique

- On suppose une dérive linéaire $dt_u(t)$

$$[\hat{dt}^u](t) = [\alpha] + [\beta](t - t_N)$$

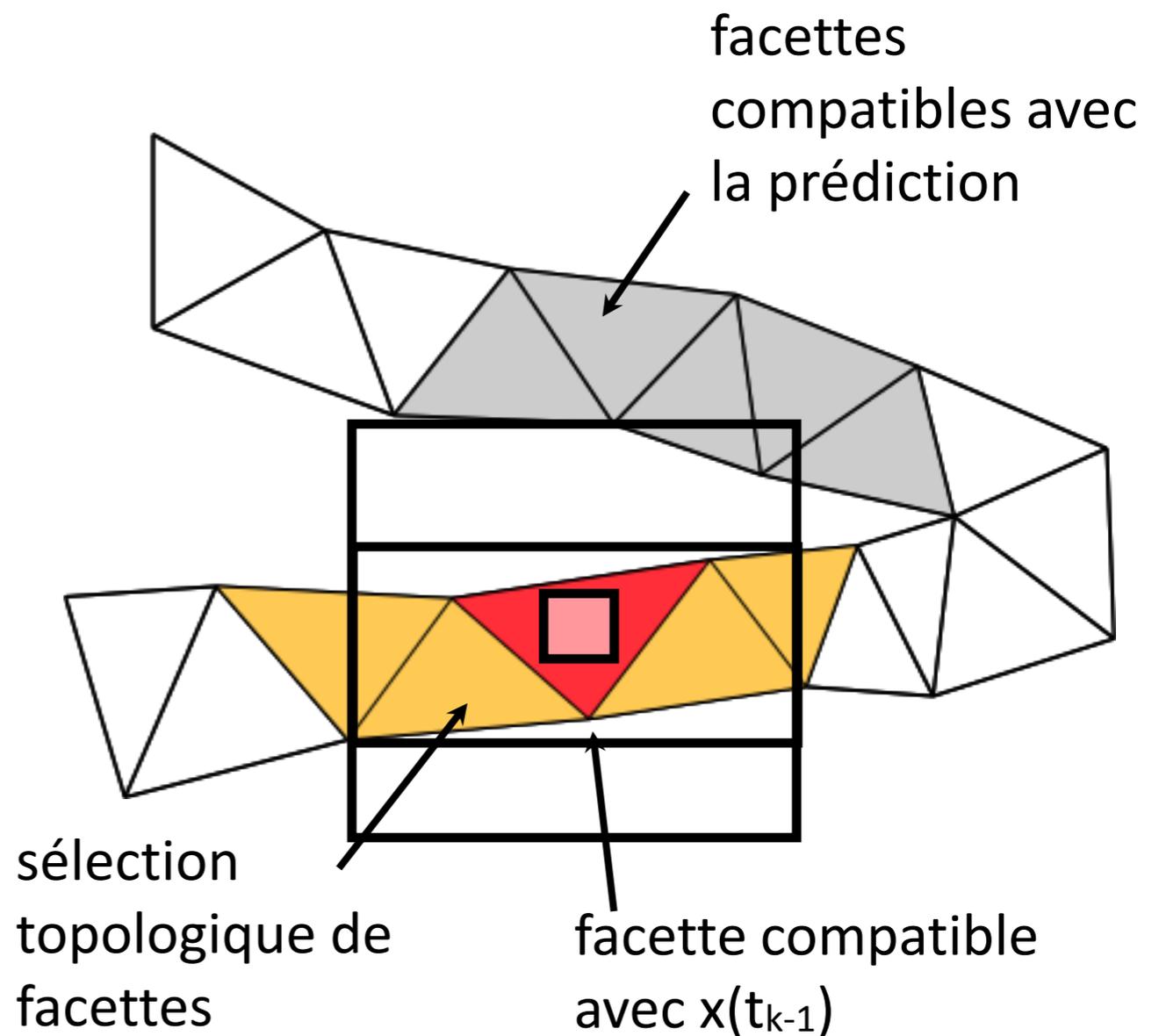
- Sauts d'horloge : détection et réinitialisation



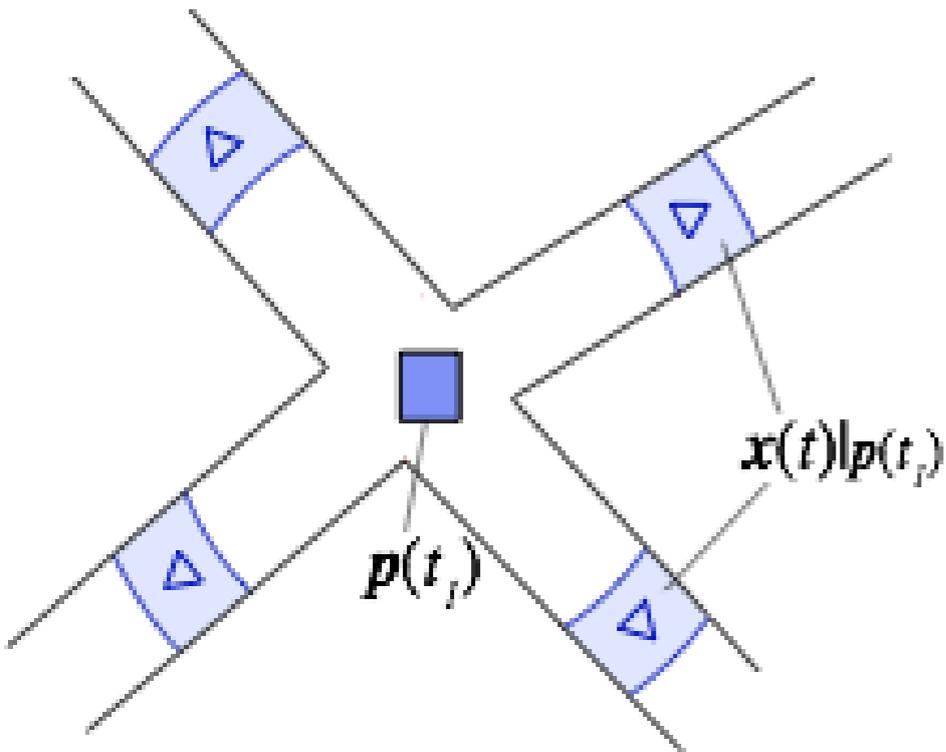
Selection de facettes et contraction (map matching)

Utilisation de la topologie pour marquer les facettes éligibles à partir des facettes de l'époque précédente.

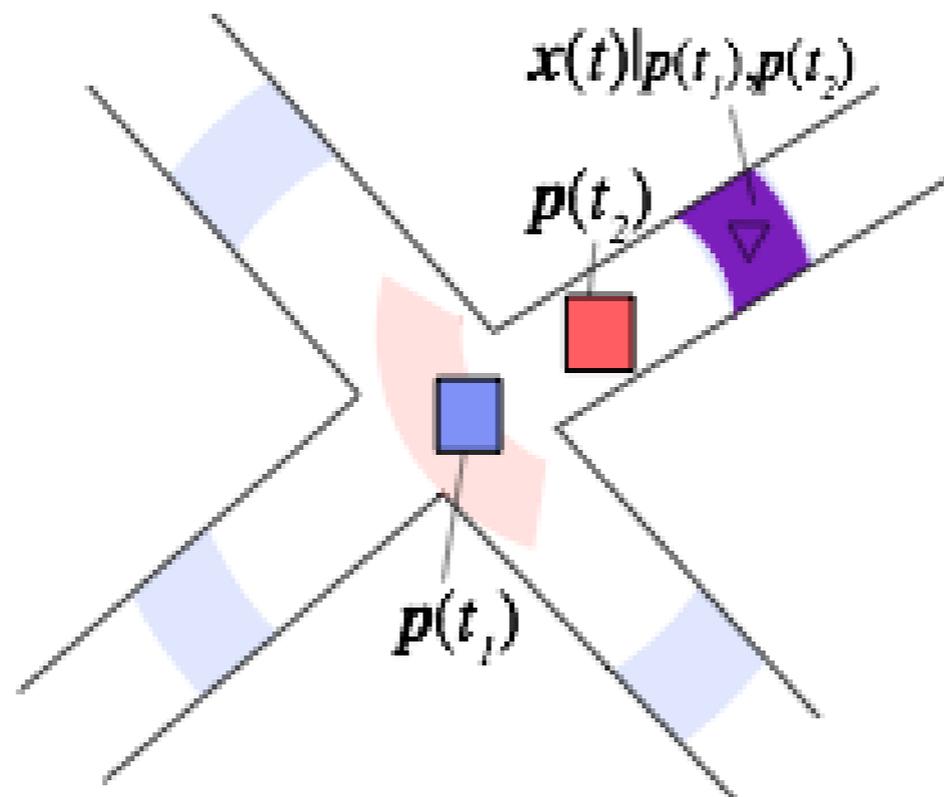
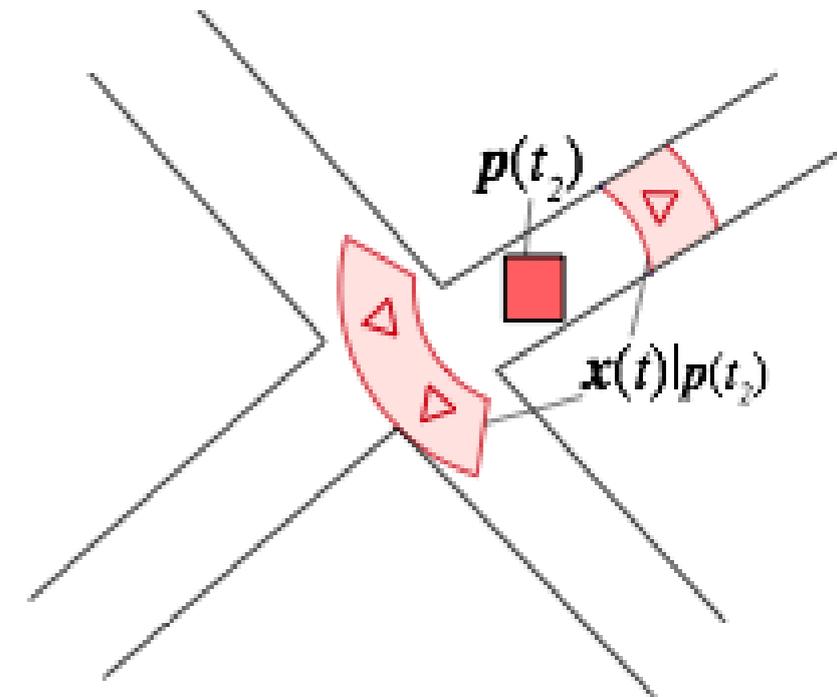
- Accélère le calcul
- Limite les solutions ambiguës dans les conditions GPS difficiles et les réseaux routiers denses



Exemple avec deux positions dans l'historique



Le résultat est l'intersection des poses prédites de chacune des positions du buffer



Résultats

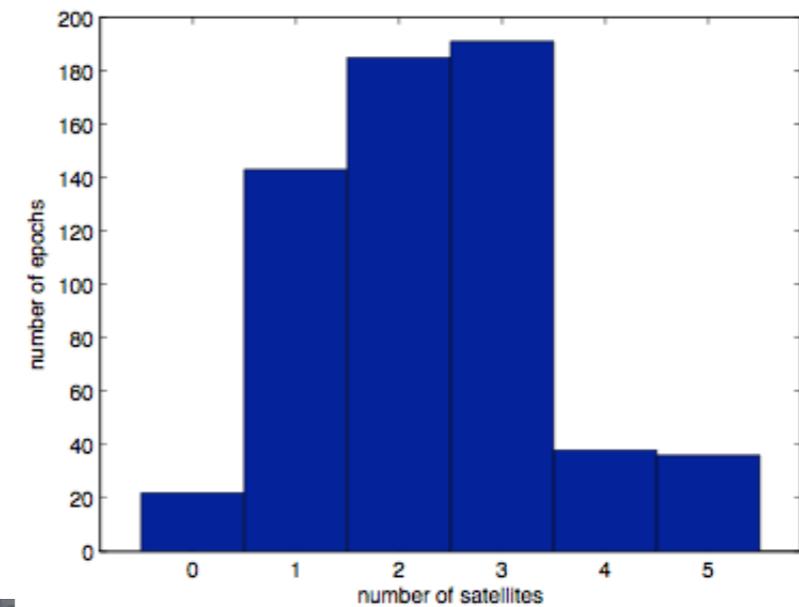


Essai CityVIP : Mairie du XII^e arrondissement de Paris

Boucle d'1 km

Mauvaise visibilité satellitaire

- 88% ≤ 3 satellites
- 56% ≤ 2 satellites



Résultats : Mairie du XII^e arrondissement de Paris

Horizon de 15 positions

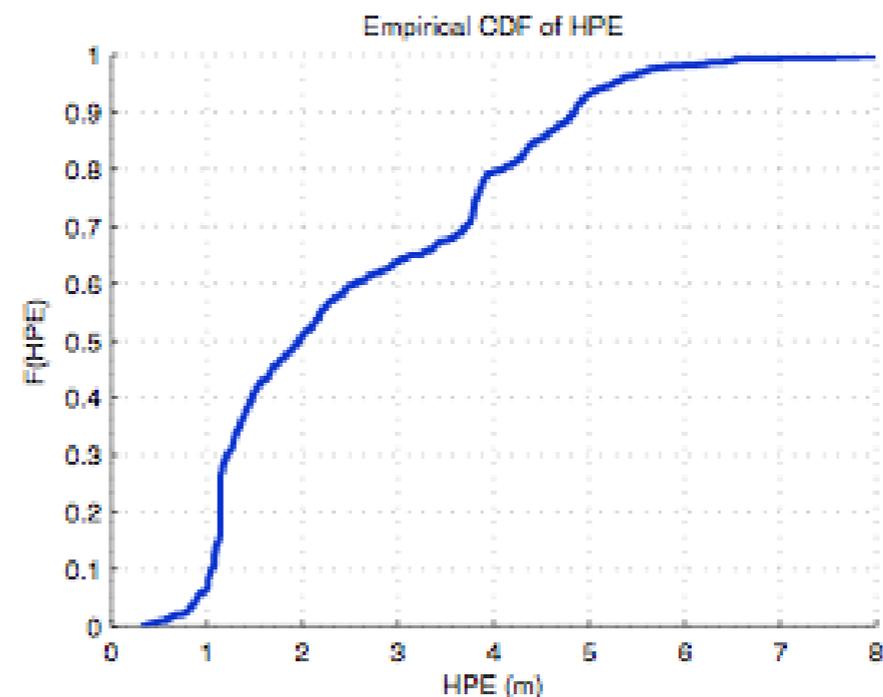
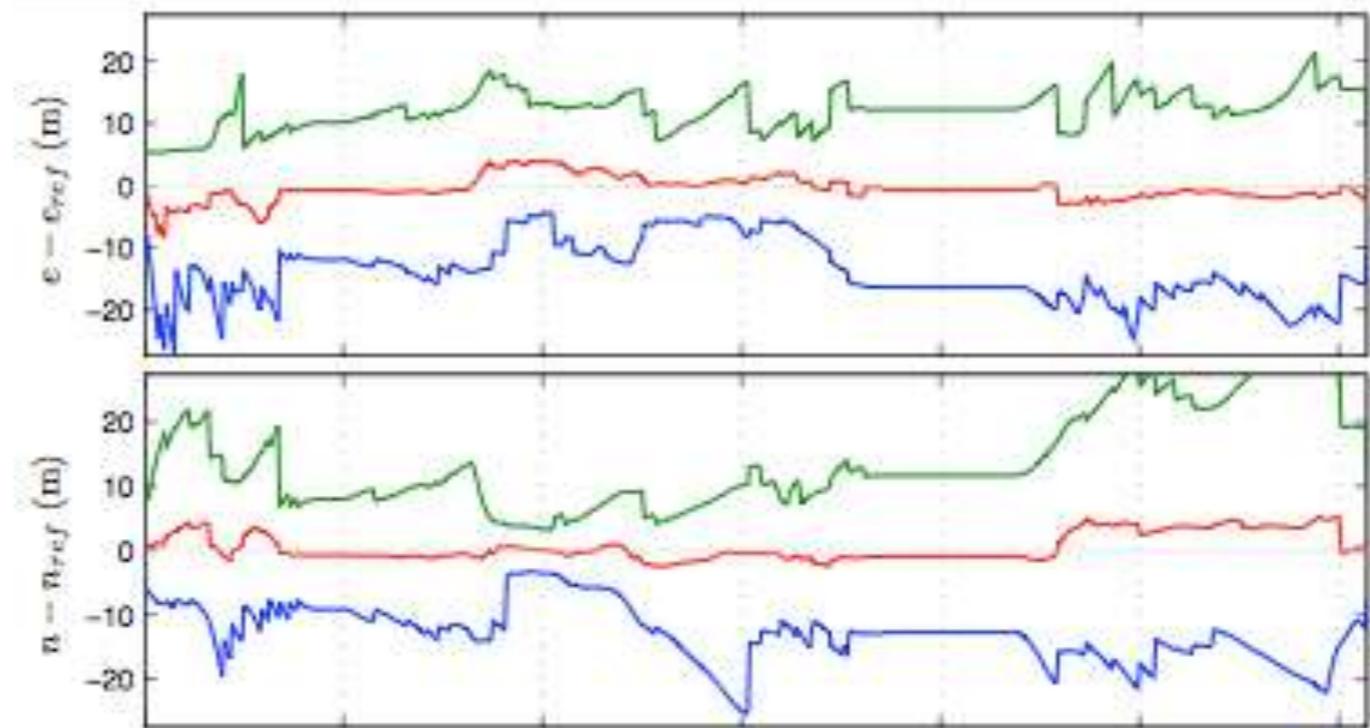
$q = 1$

$R \leq 1.05 \times 10^{-6}$

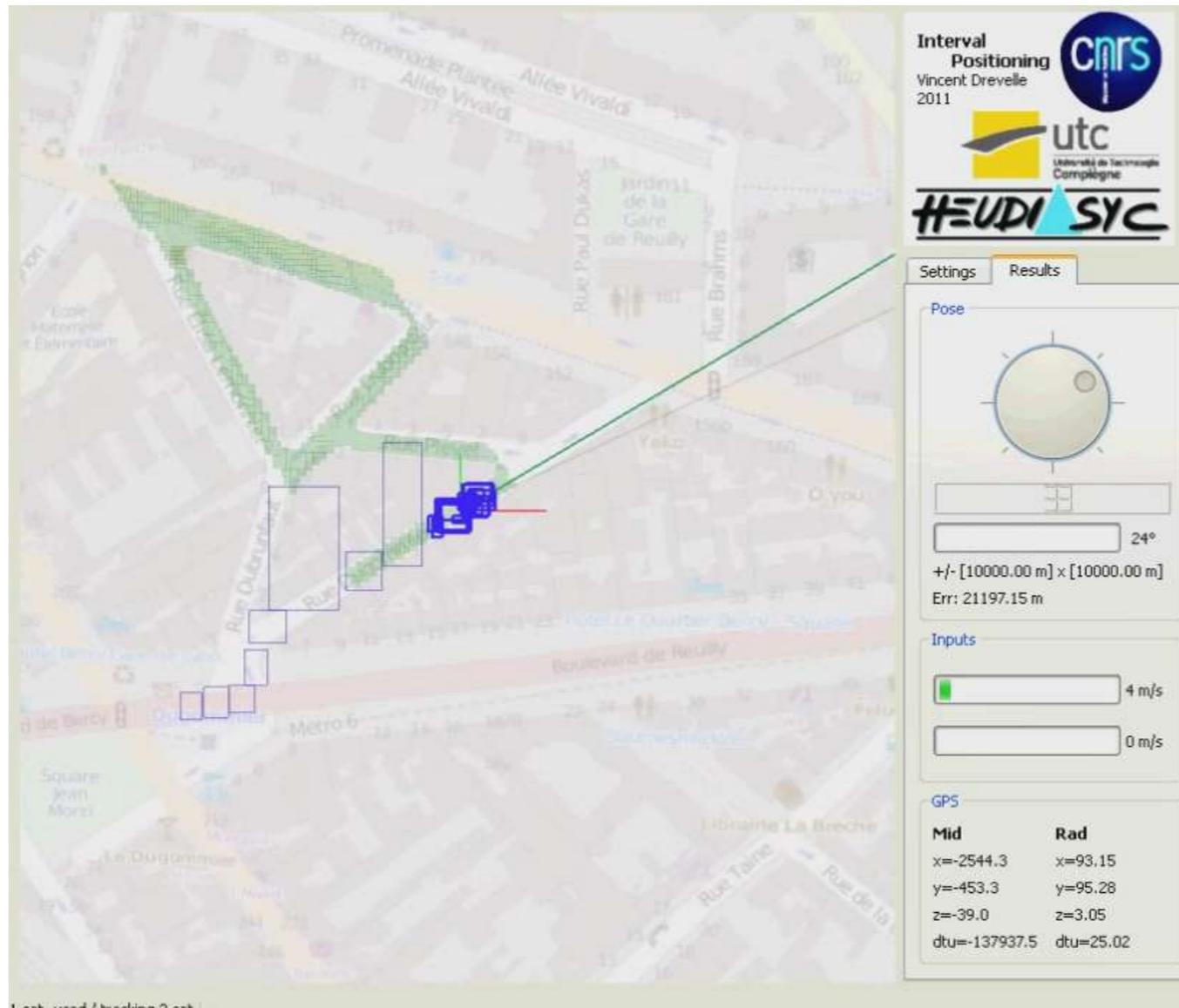
Les bornes sont consistantes avec la vérité terrain

Centre de gravité :

- 95% erreur $\leq 5.25\text{m}$



Résultats : Mairie du XII^e arrondissement de Paris



Conclusion (1/2)

Formalisation ensembliste du problème de localisation avec données GPS brutes, carte et mesures proprioceptives

Calcul d'un domaine de confiance en présence de mesures aberrantes

- Approche statique : fusion serrée GPS - carte 3D
- Approche dynamique avec un historique de données

On sait calculer un domaine correspondant à un risque spécifié

L'approche développée fournit un domaine de confiance même avec très peu de satellites

Prise en compte des hypothèses multiples et des cas sous-déterminés

Détection et identification des mesures aberrantes

Conclusion (2/2)

Les expérimentations sur données réelles démontrent la faisabilité de l'approche.

- Faisabilité en temps réel
- Algorithme interruptible
- Détection de défaut cohérente avec l'approche classique
- Capacité d'identification de plusieurs défauts simultanés
- Les bornes sont peu (ou raisonnablement peu) pessimistes
- Peu de paramètres à régler (risque, q , taille de l'horizon)

Merci de votre attention !

- Drevelle, V. and Bonnifait, P. (2011) A set-membership approach for high integrity height-aided satellite positioning. GPS Solutions
- Drevelle, V. and Bonnifait, P. (2011) Global Positioning in Urban Areas with 3-D Maps. 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Baden-Baden
- Drevelle, V. and Bonnifait, P. (2010) Robust Positioning Using Relaxed Constraint-Propagation. IROS 2010, Taipei Taiwan
- Drevelle, V. and Bonnifait, P. (2009) Integrity Zone Computation using Interval Analysis. ENC-GNSS 2009, Naples
- Drevelle, V. and Bonnifait, P. (2009) High integrity GNSS location zone characterization using interval analysis. ION GNSS 2009, Savannah, USA