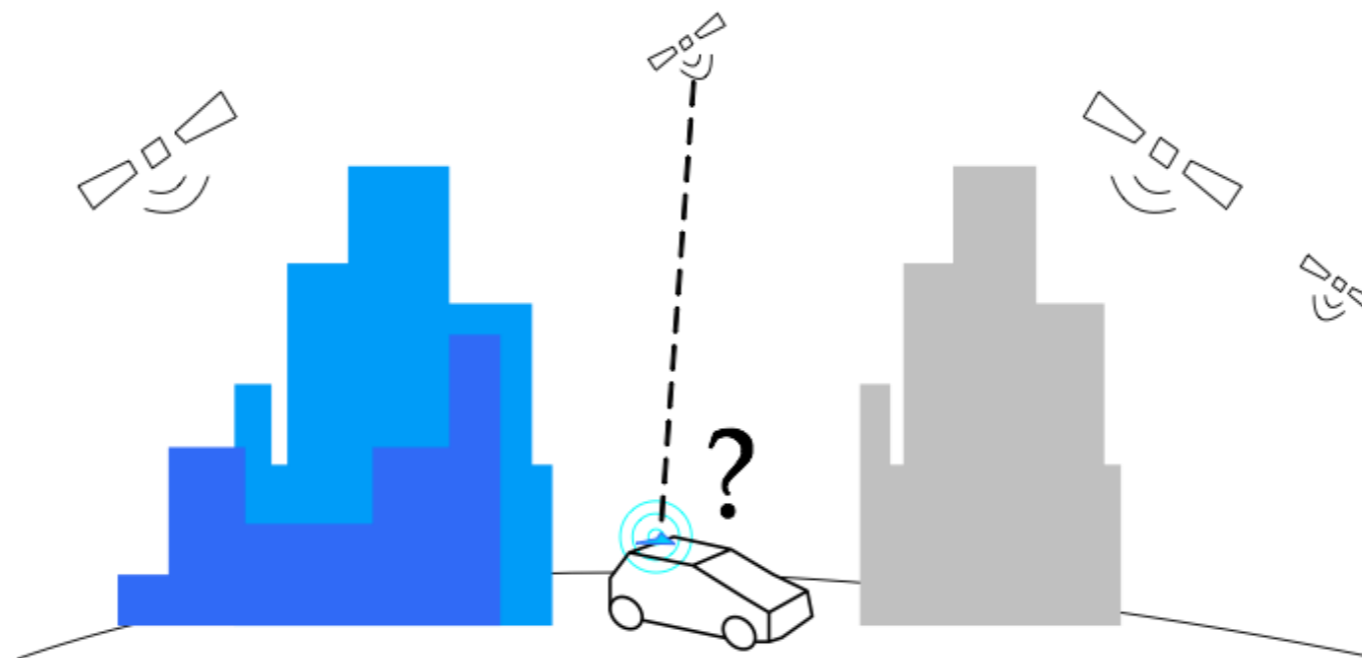


# On the use of GPS and 3D Road Surface Maps for the Navigation of Road Vehicles in Urban Environments



**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<sup>er</sup> décembre 2011



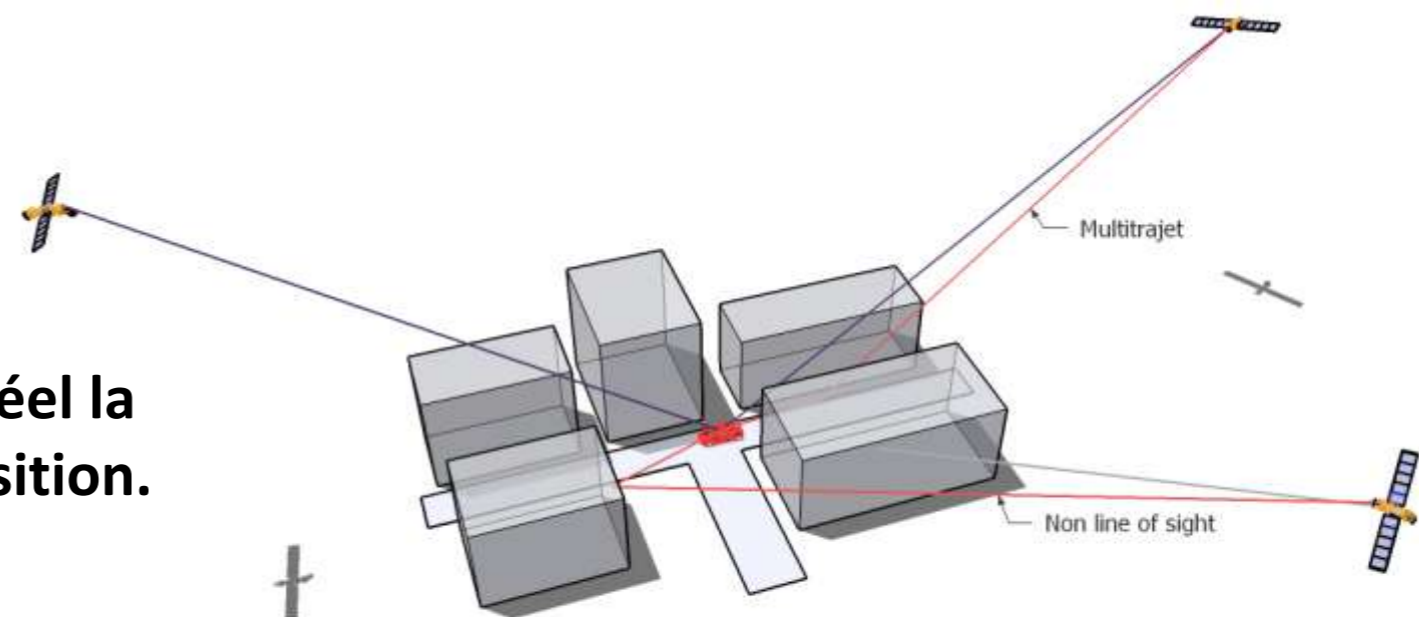
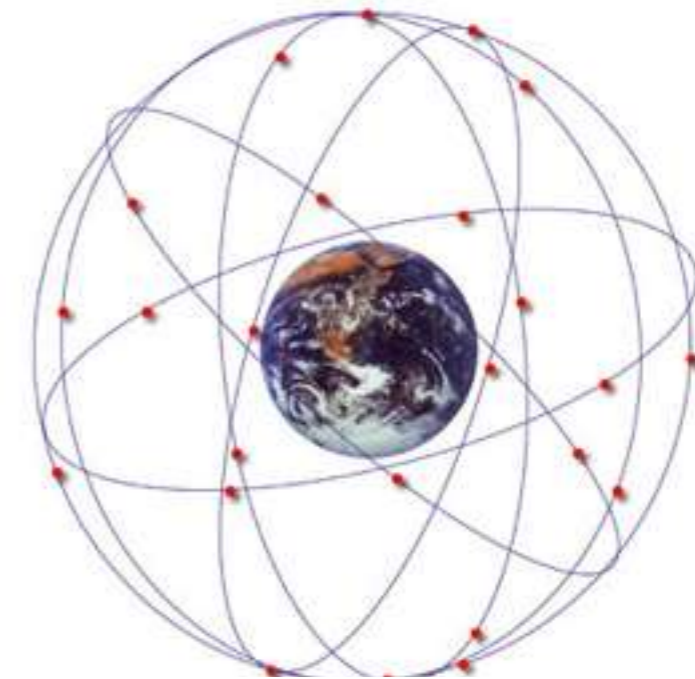
# Incertitude de localisation

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.

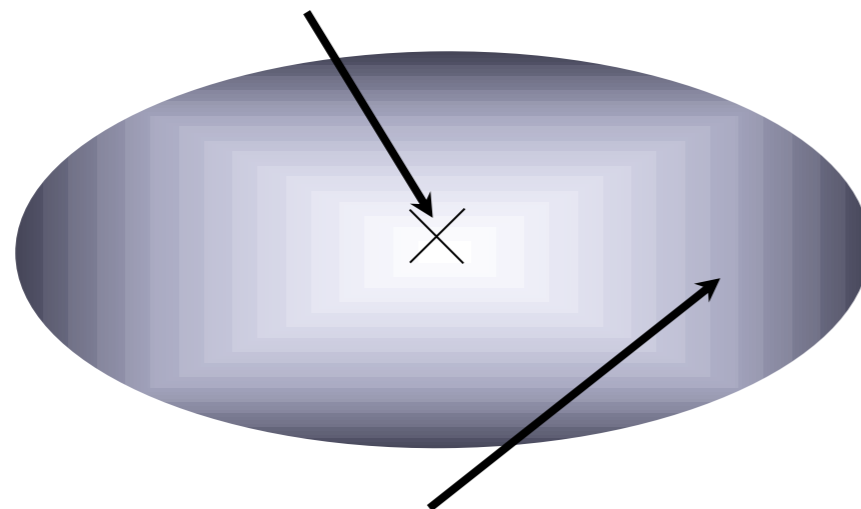


# Confiance

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

Ellipsoïdes d'incertitude

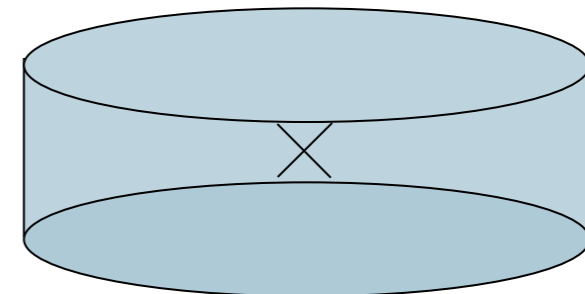
Vous êtes probablement ici...



...et moins probablement ici

Niveaux de protection

Vous êtes dans cette boîte



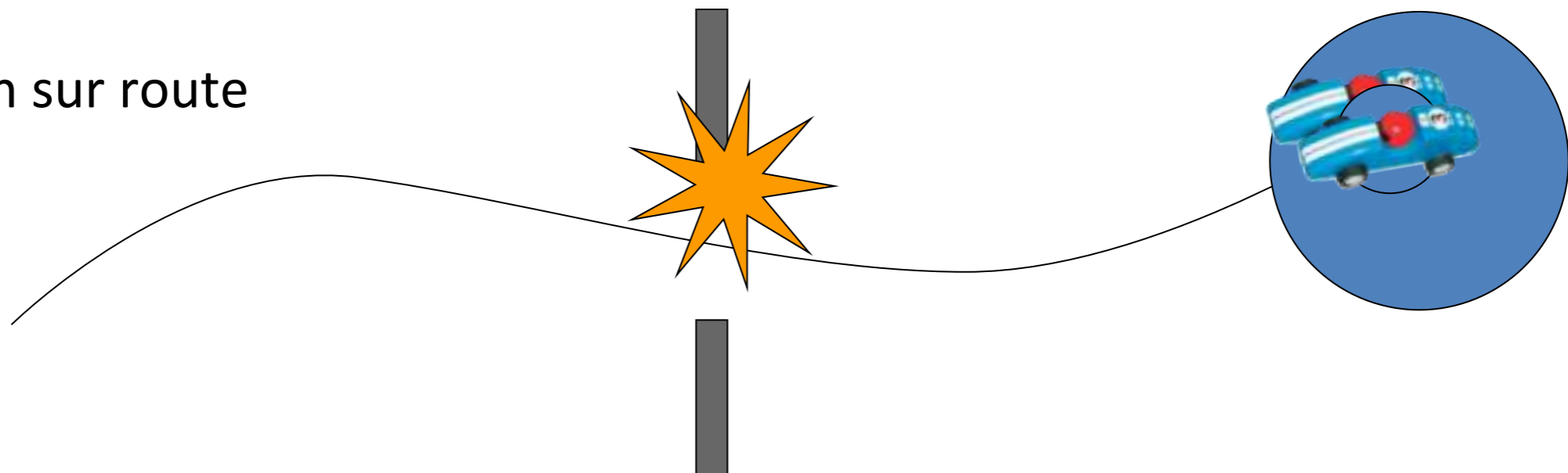
# Utilisation de la confiance lors de la navigation

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]*

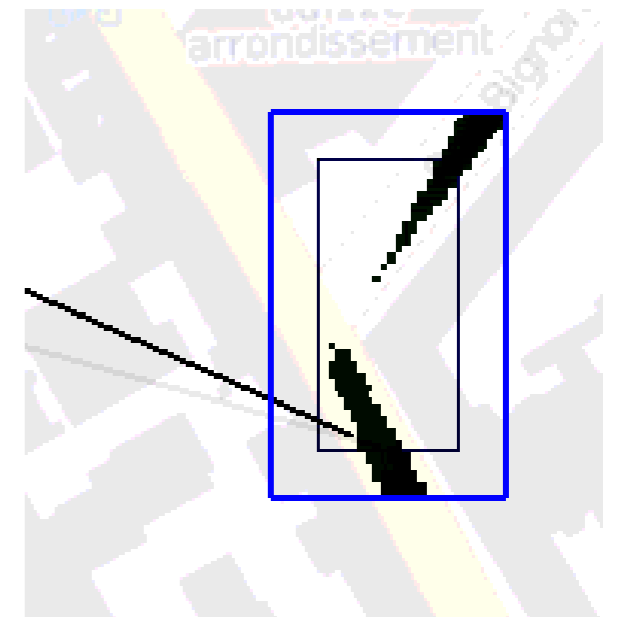
# Approche ensembliste

## 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

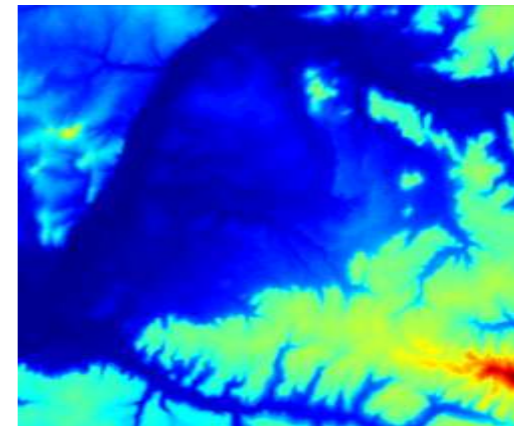
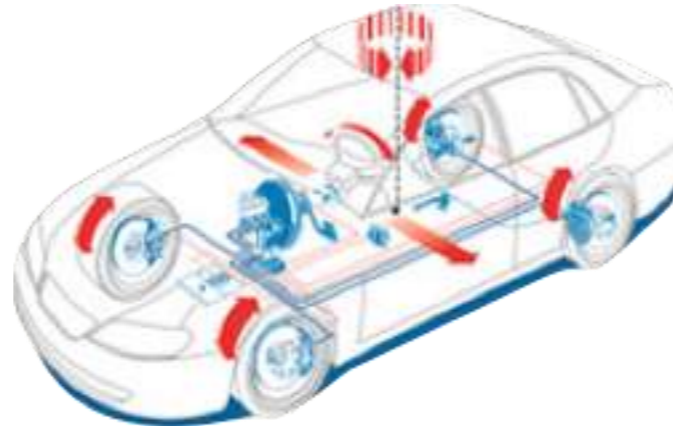


# Plan

- 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

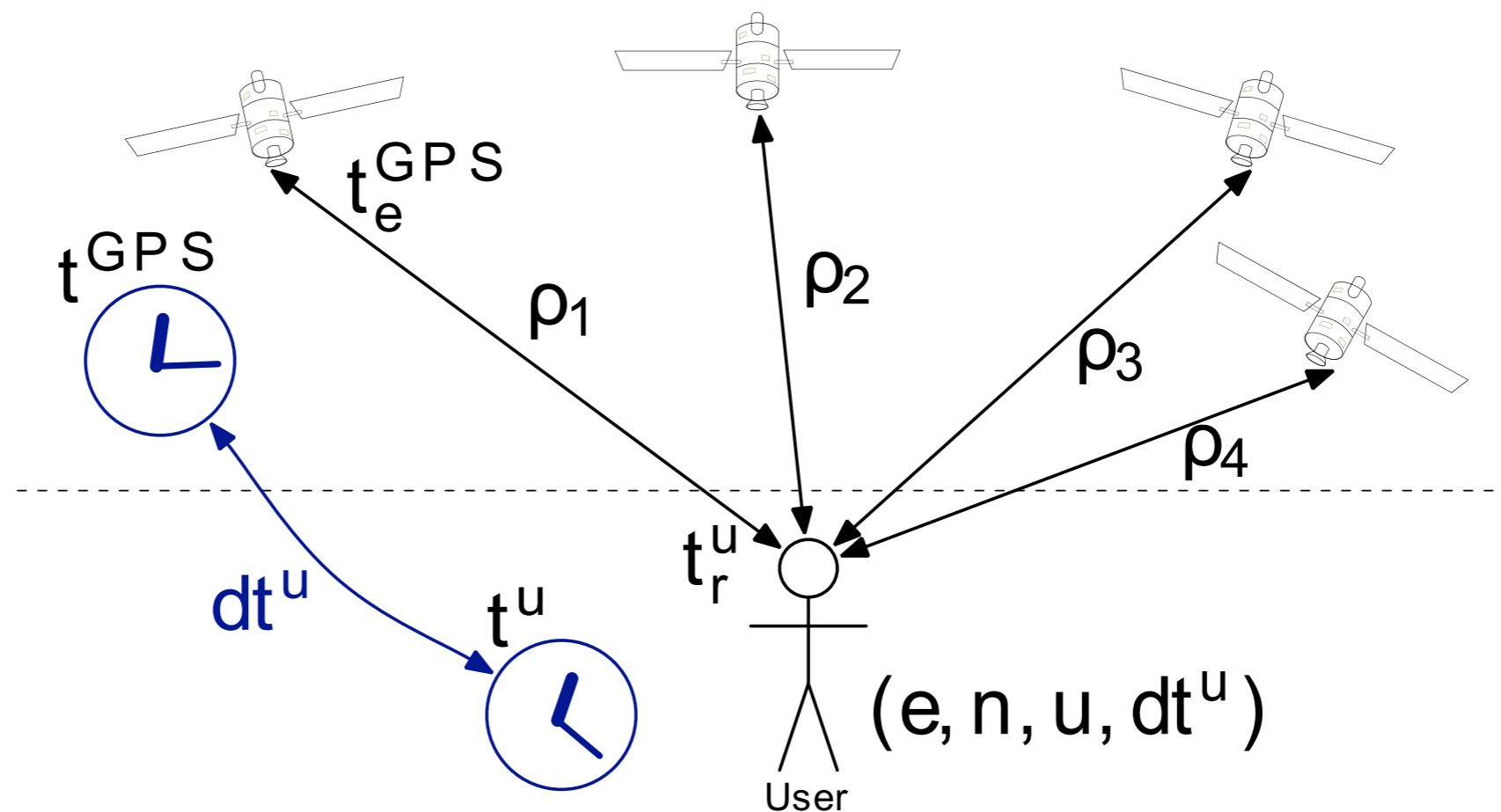


- système de positionnement global
- position absolue, idéale pour la navigation sur carte
- bon marché, précis en environnement dégagé
- dépendant de la visibilité des satellites



# Les Systèmes de Positionnement par Satellites (GNSS)

## Pseudodistances : mesures de temps de vol

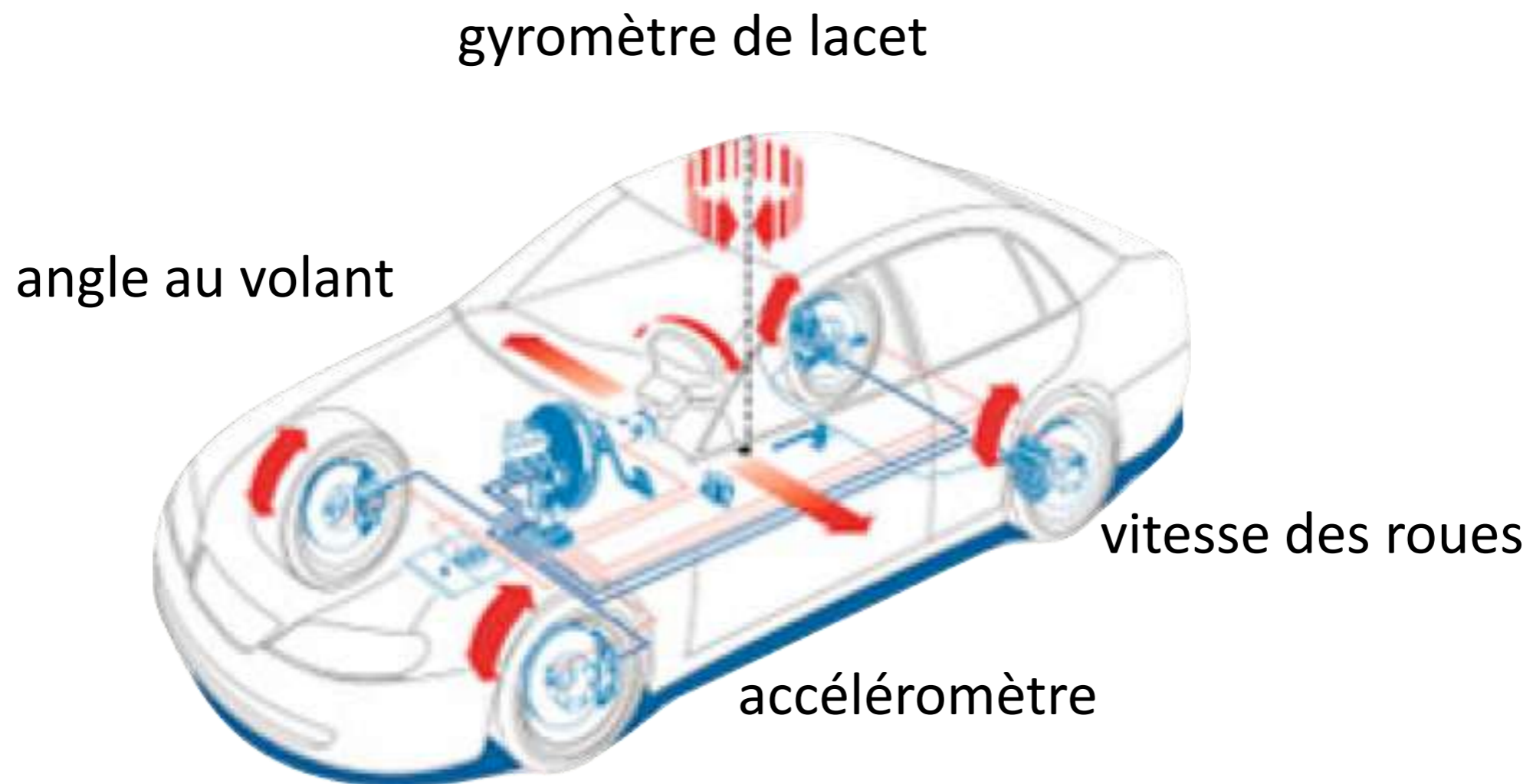


$$\begin{cases} \rho_1 = \sqrt{(x - x_{s1})^2 + (y - y_{s1})^2 + (z - z_{s1})^2} + c \cdot dt_u \\ \rho_2 = \sqrt{(x - x_{s2})^2 + (y - y_{s2})^2 + (z - z_{s2})^2} + c \cdot dt_u \\ \dots \\ \rho_p = \sqrt{(x - x_{sp})^2 + (y - y_{sp})^2 + (z - z_{sp})^2} + c \cdot dt_u \end{cases}$$

# 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)

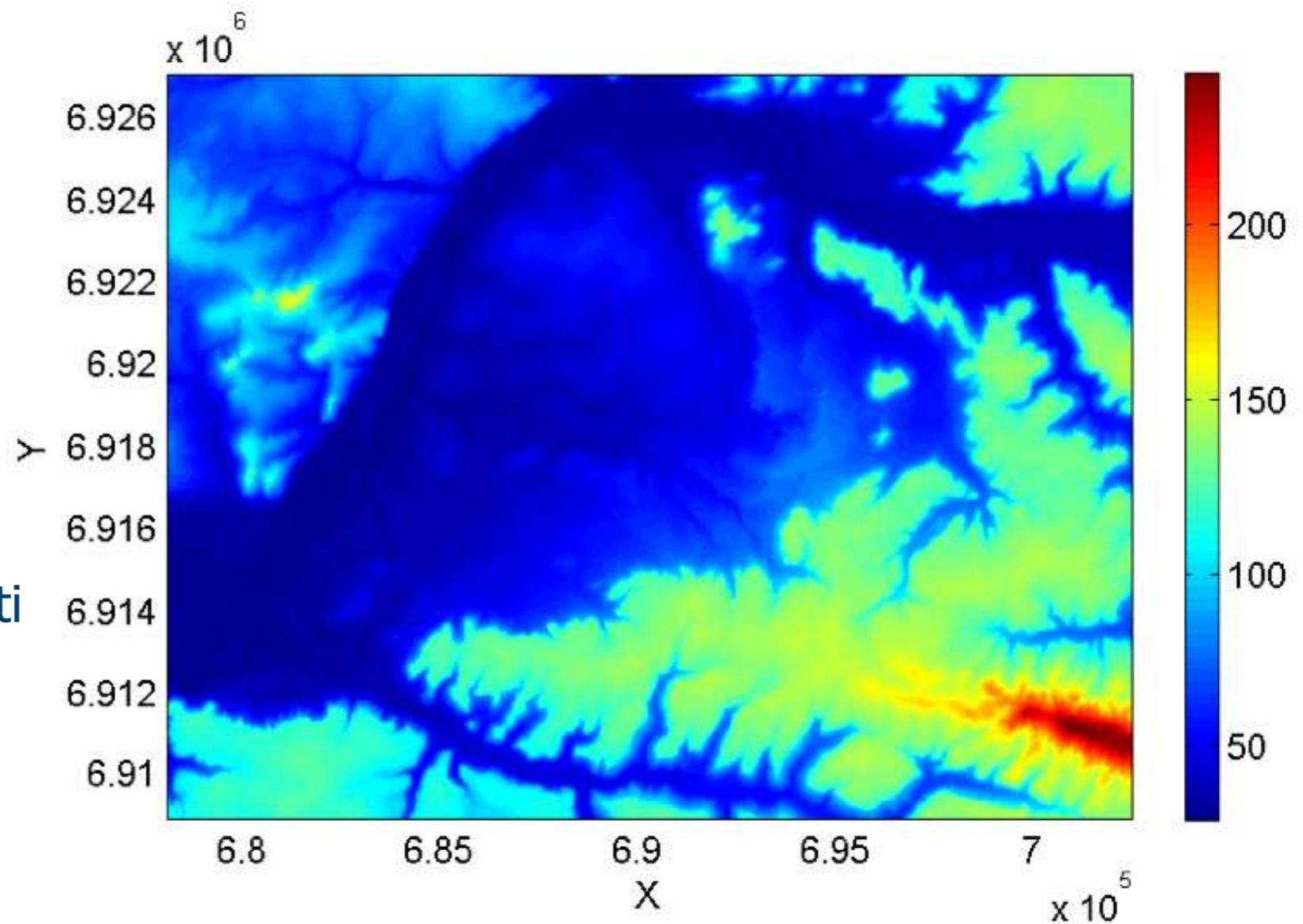
### Exemples :

SRTM-3 (NASA) : Monde

- maillage 90 m /  $\pm 14$  m alti

MNT BD Topo (IGN) : France

- maillage 25 m /  $\pm 1$  m alti

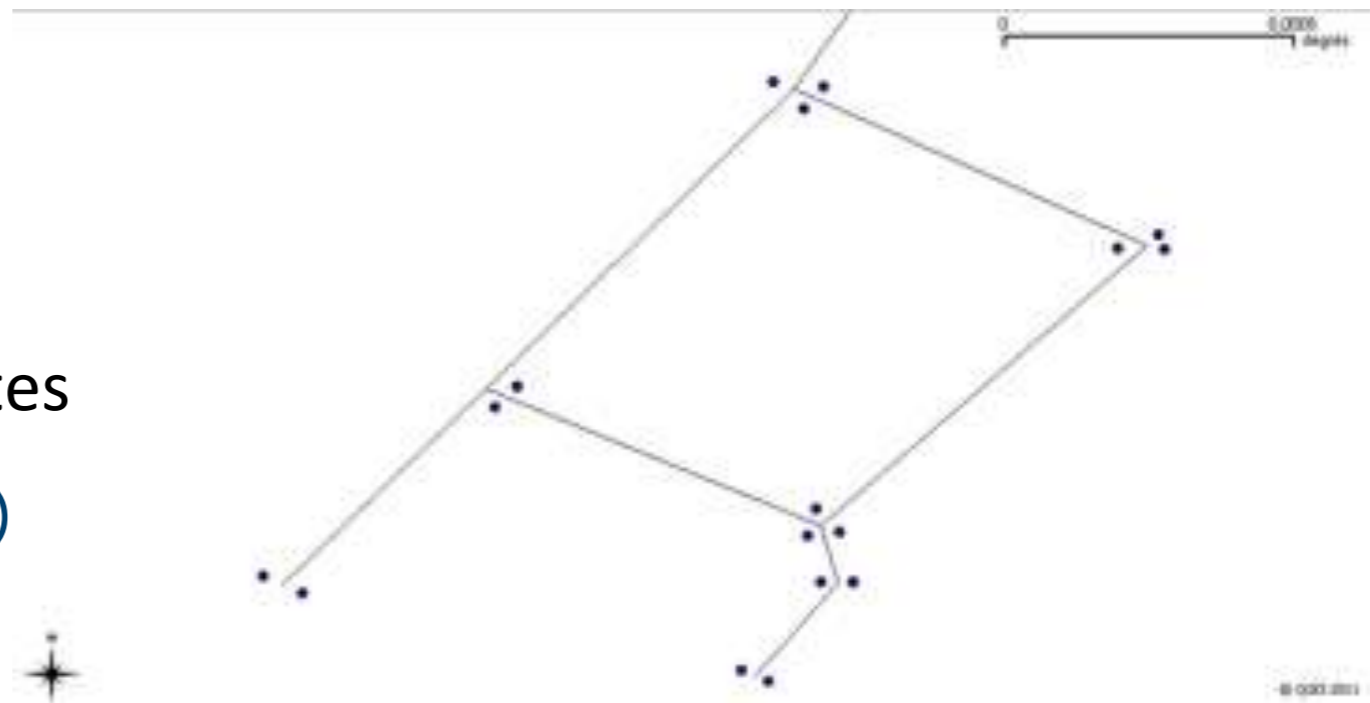


# Cartographie

## 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

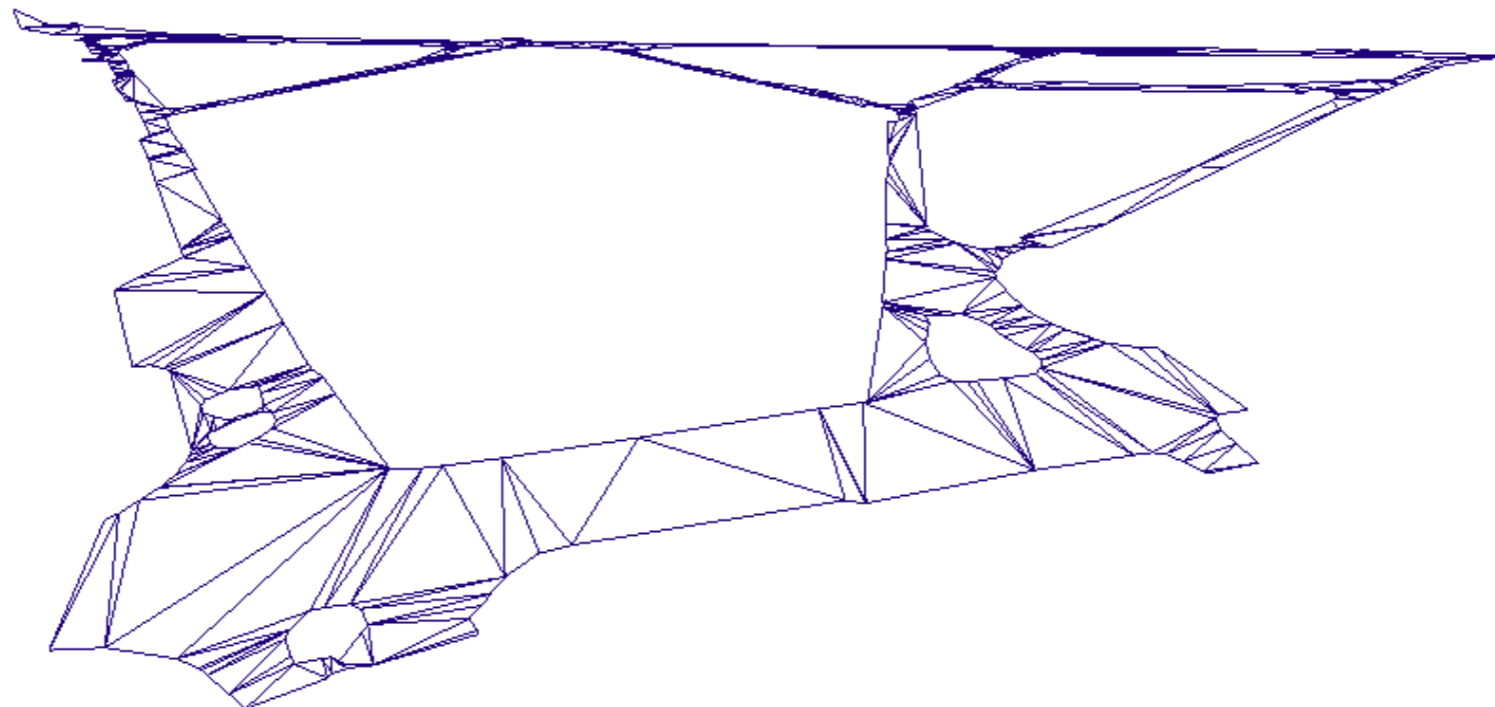


*[Paparoditis et al, 2000] Surface reconstruction in urban areas from multiple views of aerial digital frame cameras*

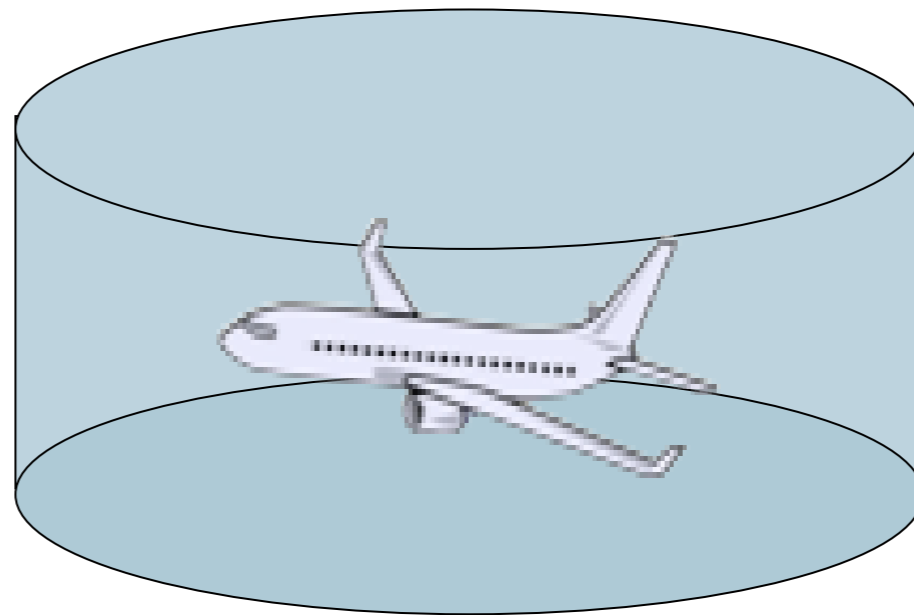
# Carte 3D, Mairie du XII<sup>e</sup> arrondissement de Paris

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

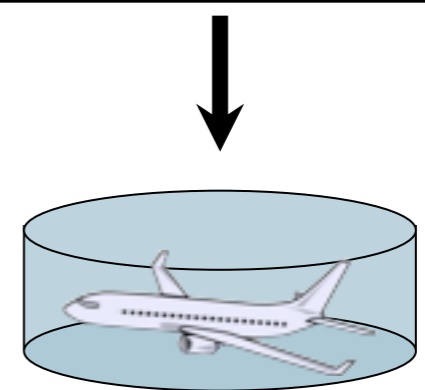
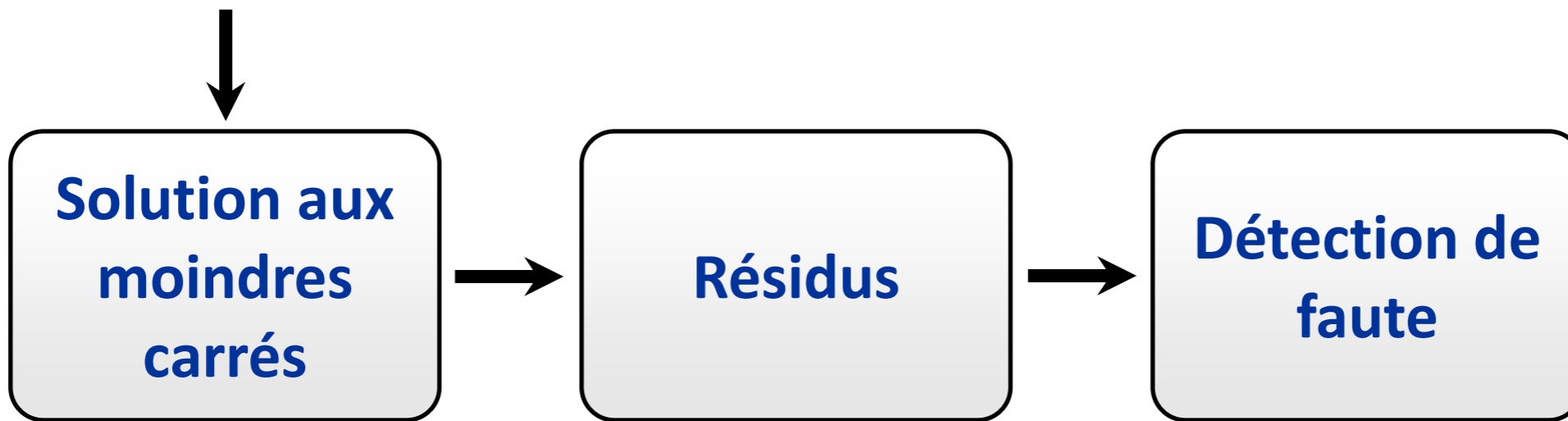
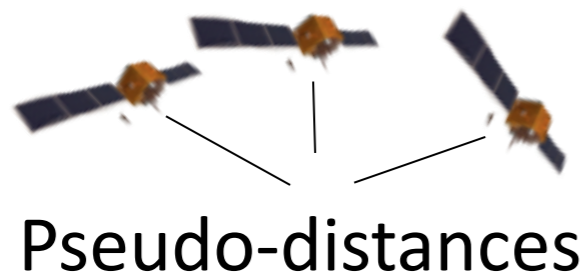


## Calcul classique d'intégrité





# Surveillance autonome d'intégrité



[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 $\chi^2$

## Somme des résidus au carré (NSSE)

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

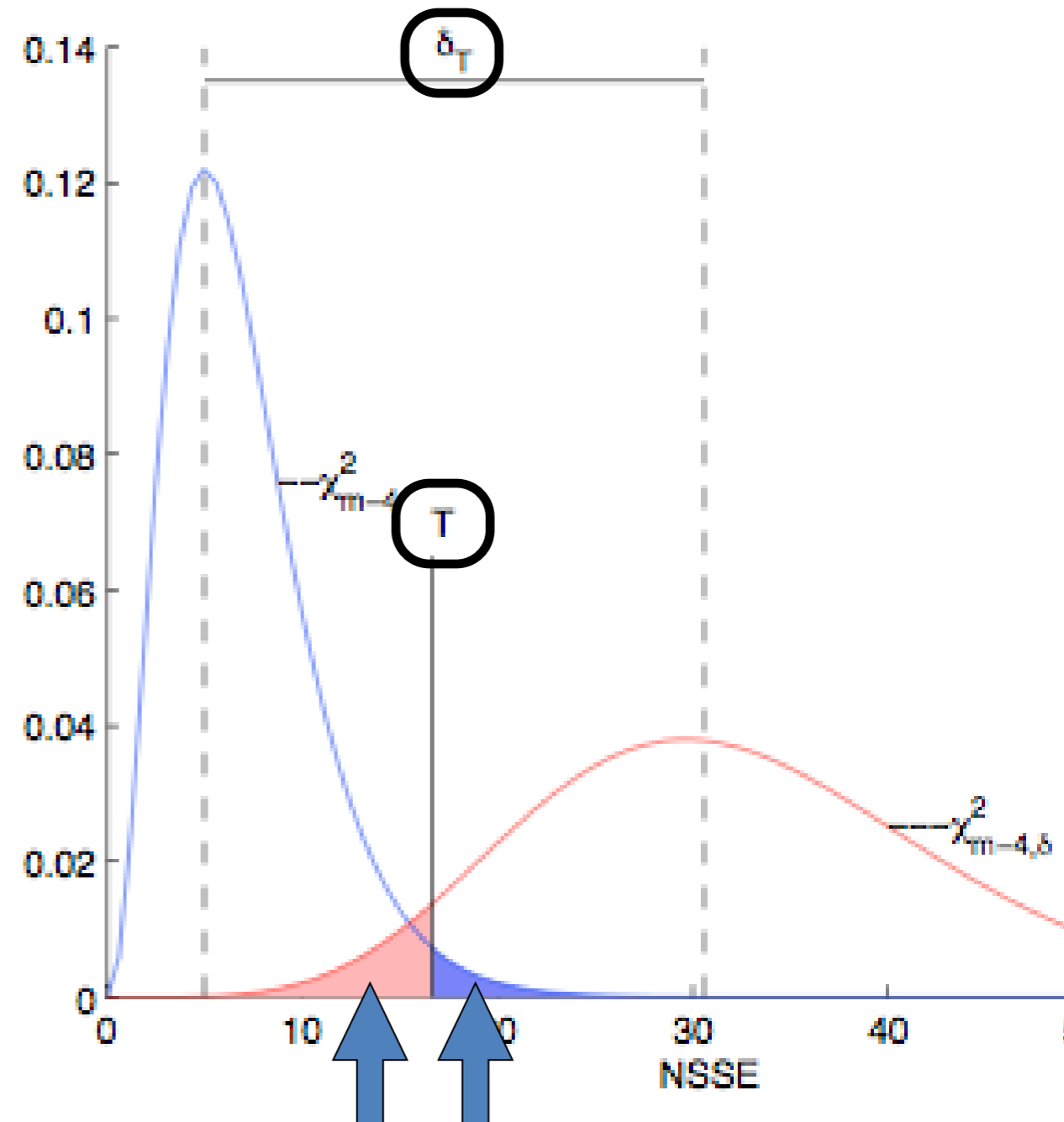
Faute : NSSE suit une loi du Chi-2 non-centrée

## Probabilité de fausse alarme

Définit le seuil T du test

## Probabilité de non-détection

Définit le paramètre de non-centralité  $\delta$



# 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

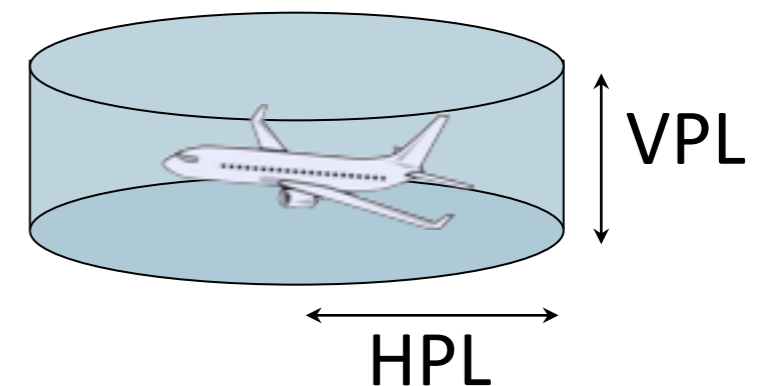
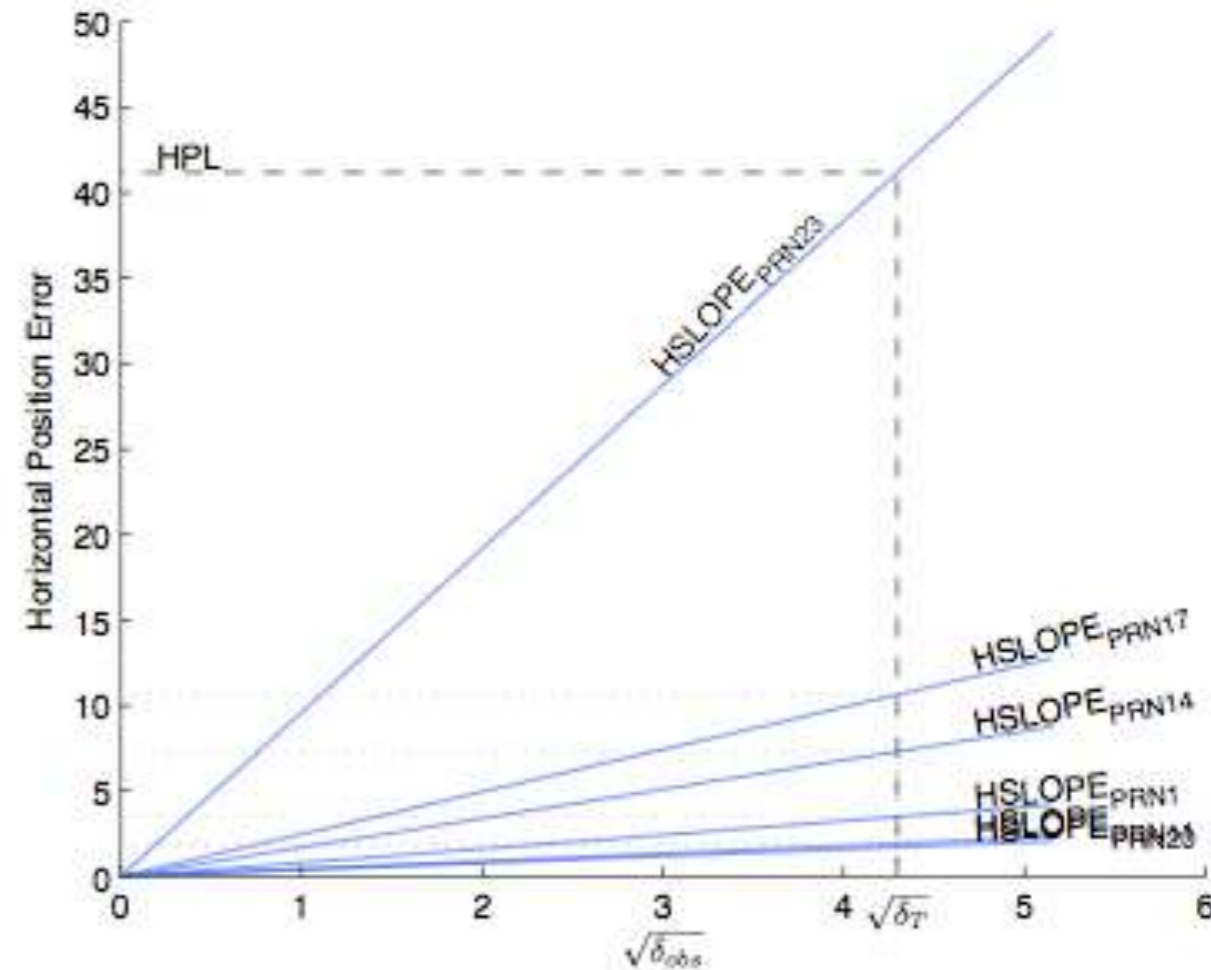
Impact des défauts sur l'erreur de position

## HPL, VPL : Niveaux de protection

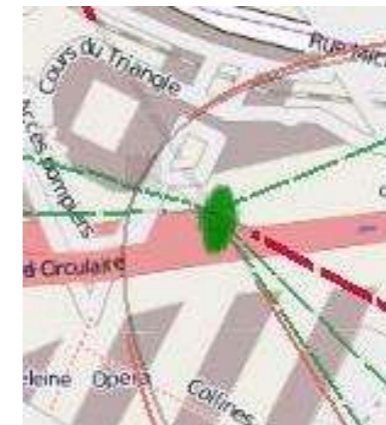
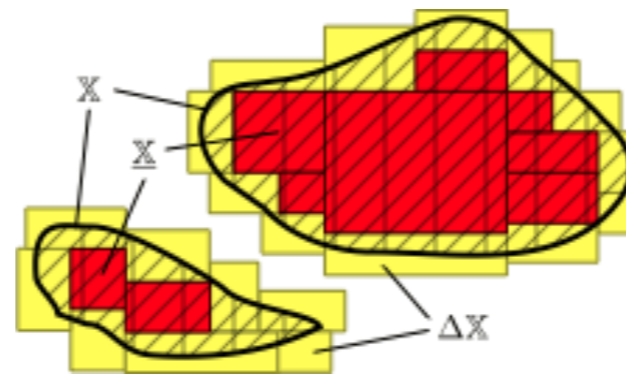
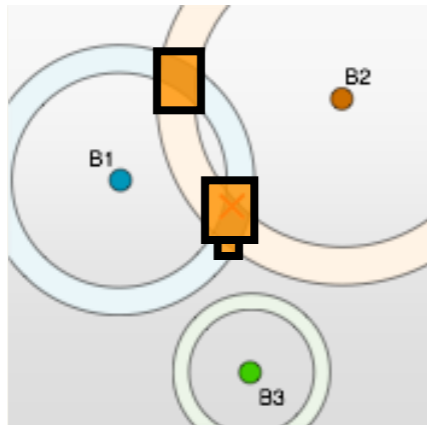
Bornes *a priori* de l'erreur de position résultant d'une faute non détectée

## HUL, VUL : Niveaux d'incertitude

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



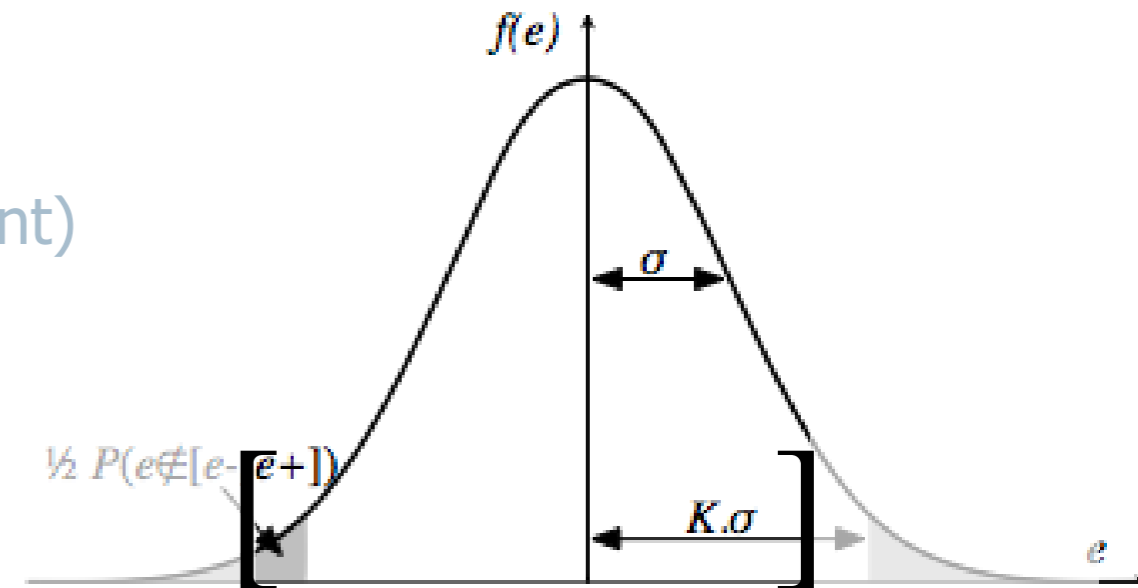
# Approche ensembliste pour l'intégrité de la localisation statique



# 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

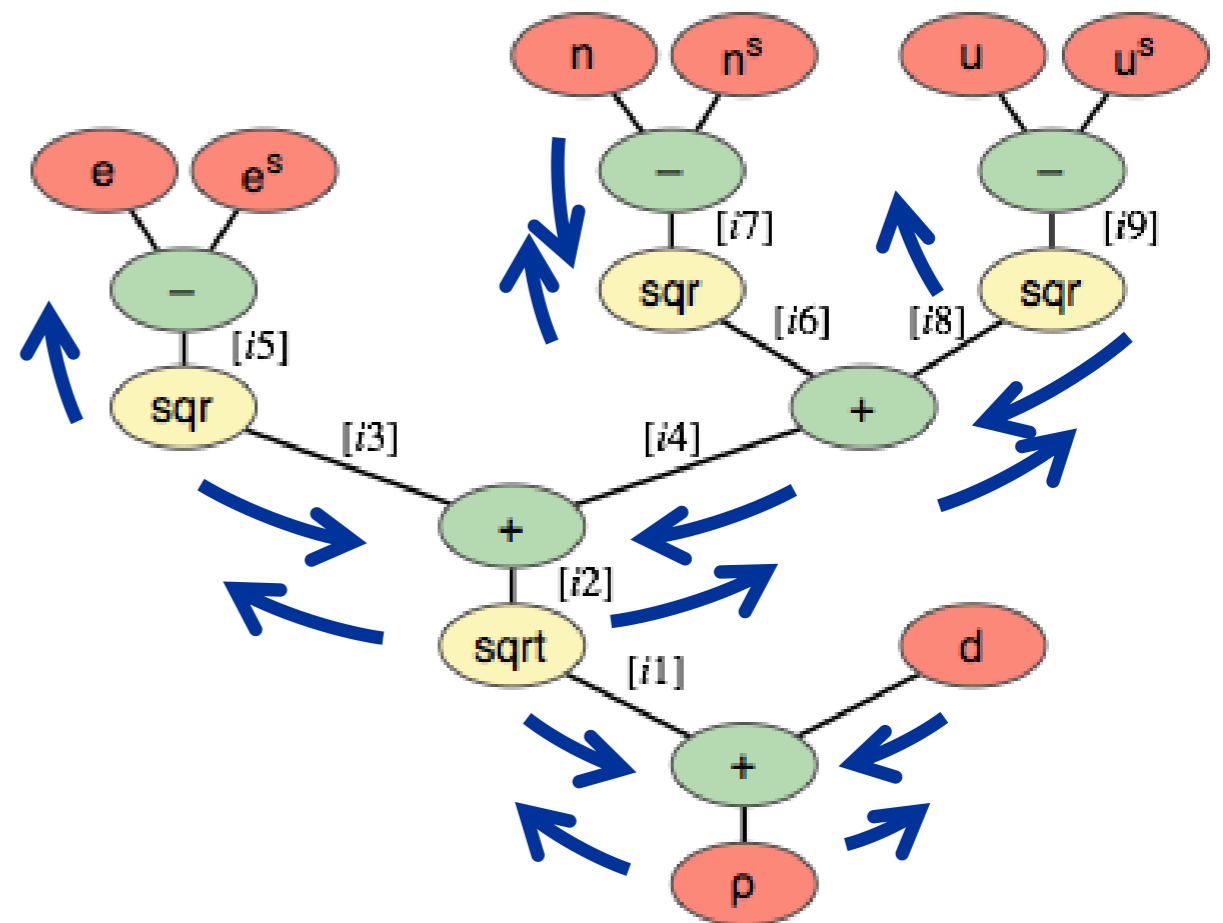
Chaque pseudodistance est une contrainte sur la position

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

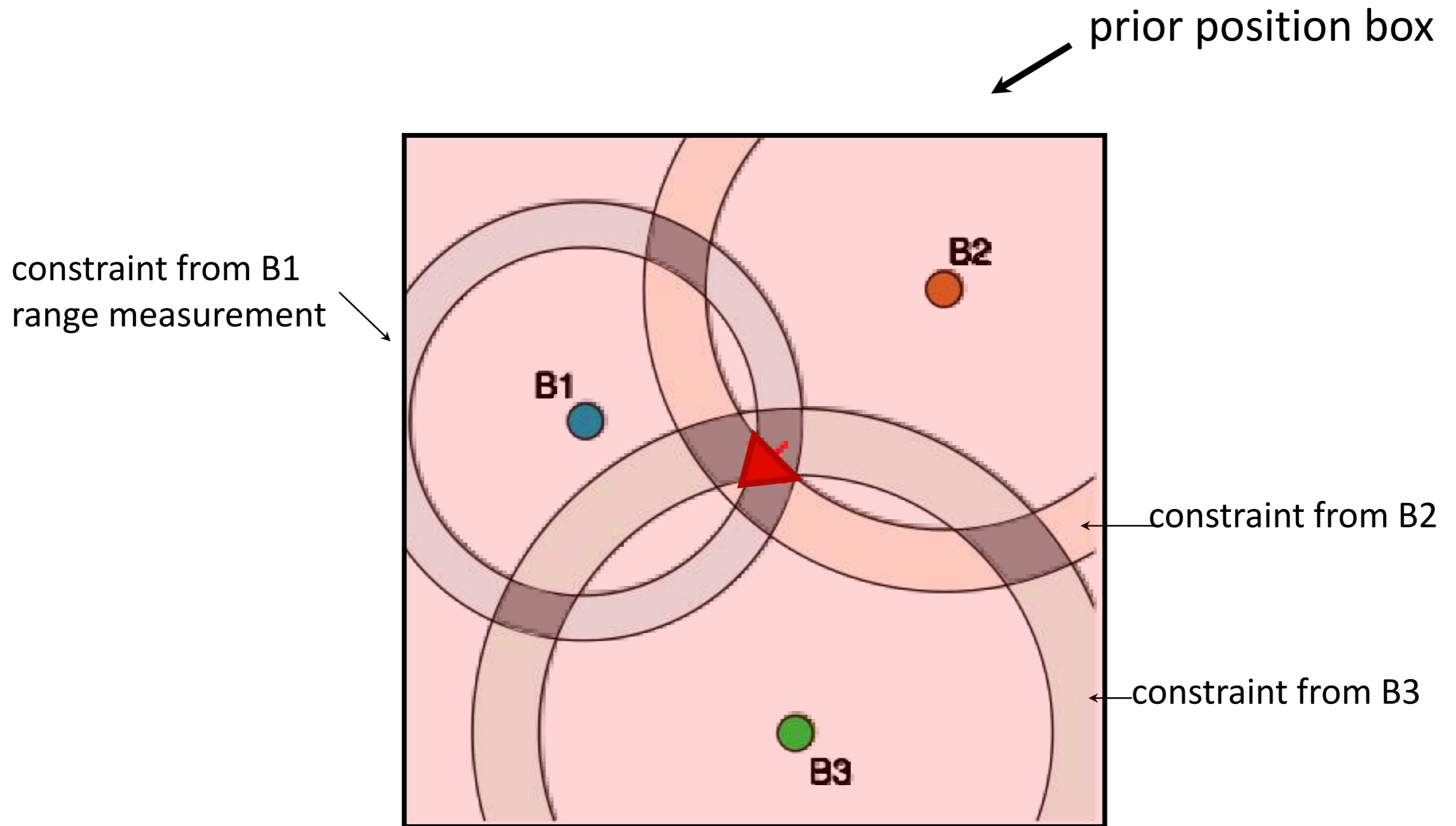
**La position est contractée en utilisant la propagation de contraintes**

Les domaines des variables sont réduits sans perdre de solution

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

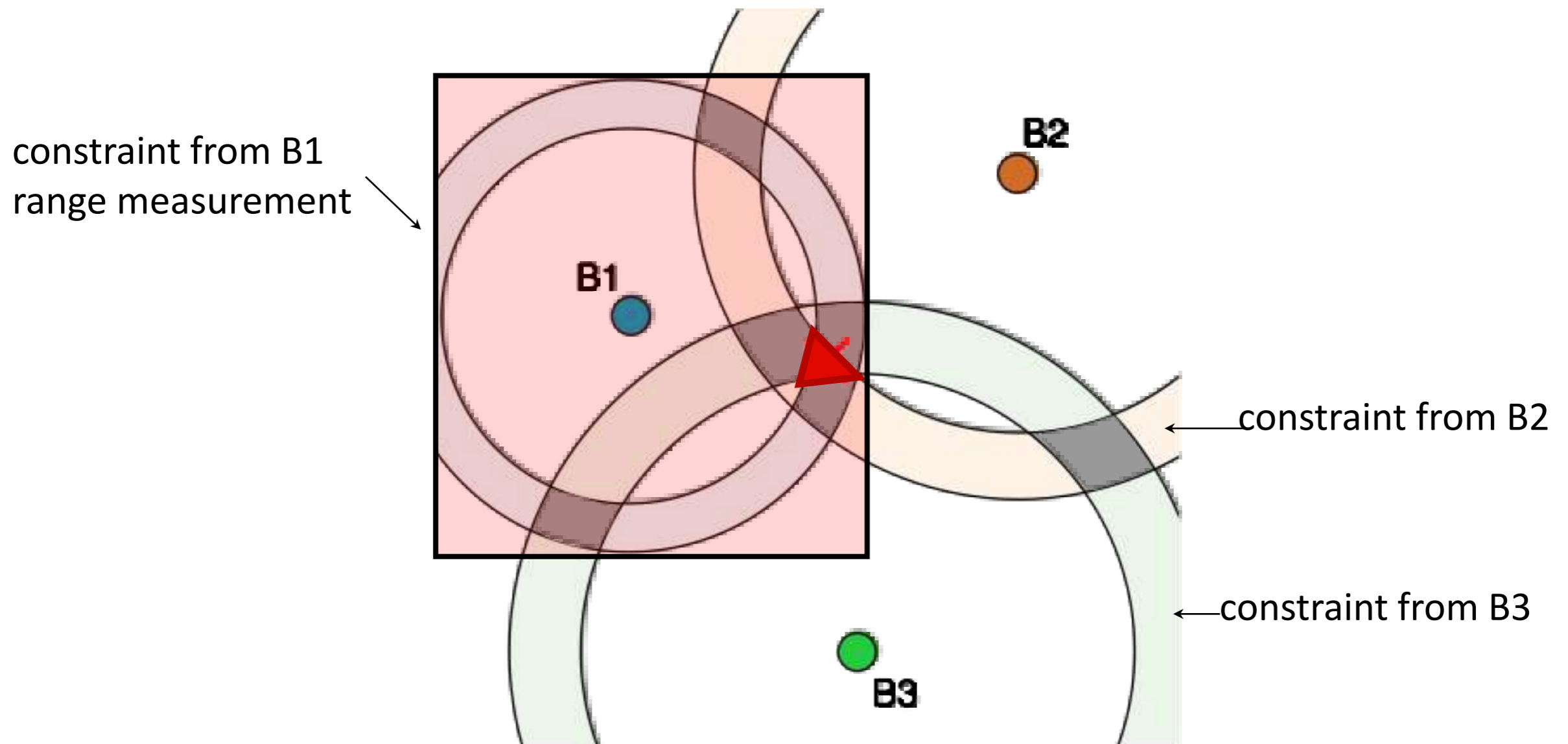


## Exemple simplifié en 2D : contraction

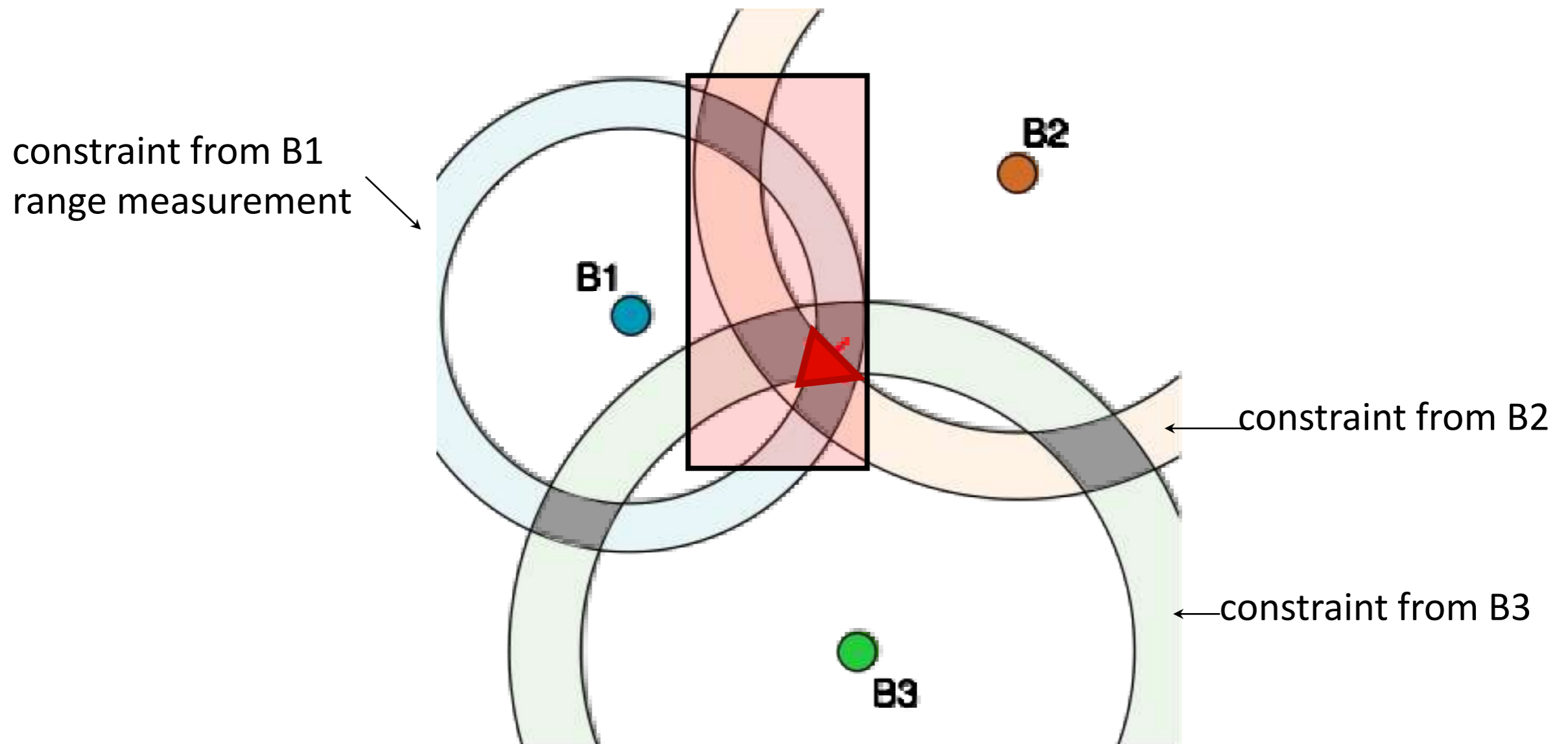




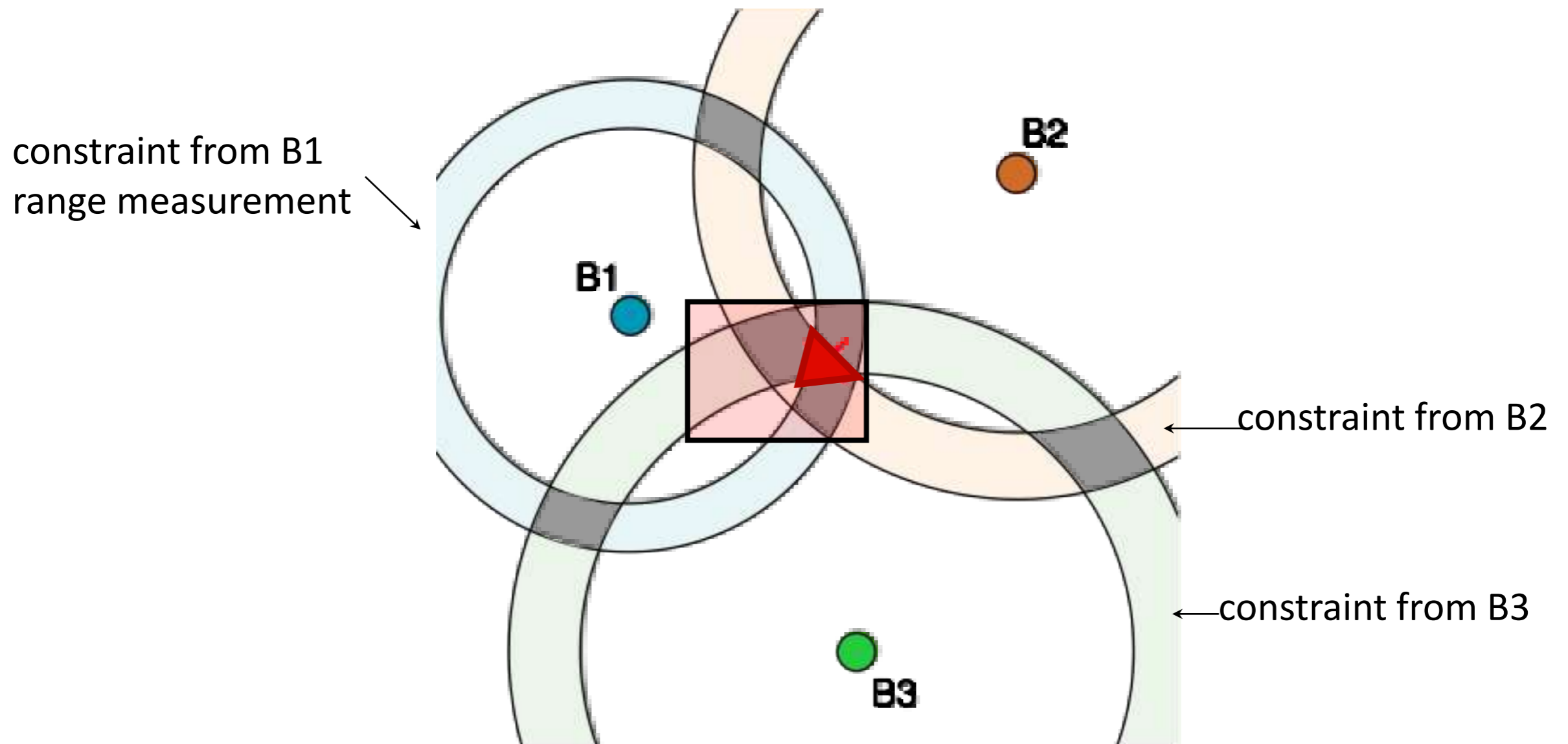
## Exemple simplifié en 2D : contraction



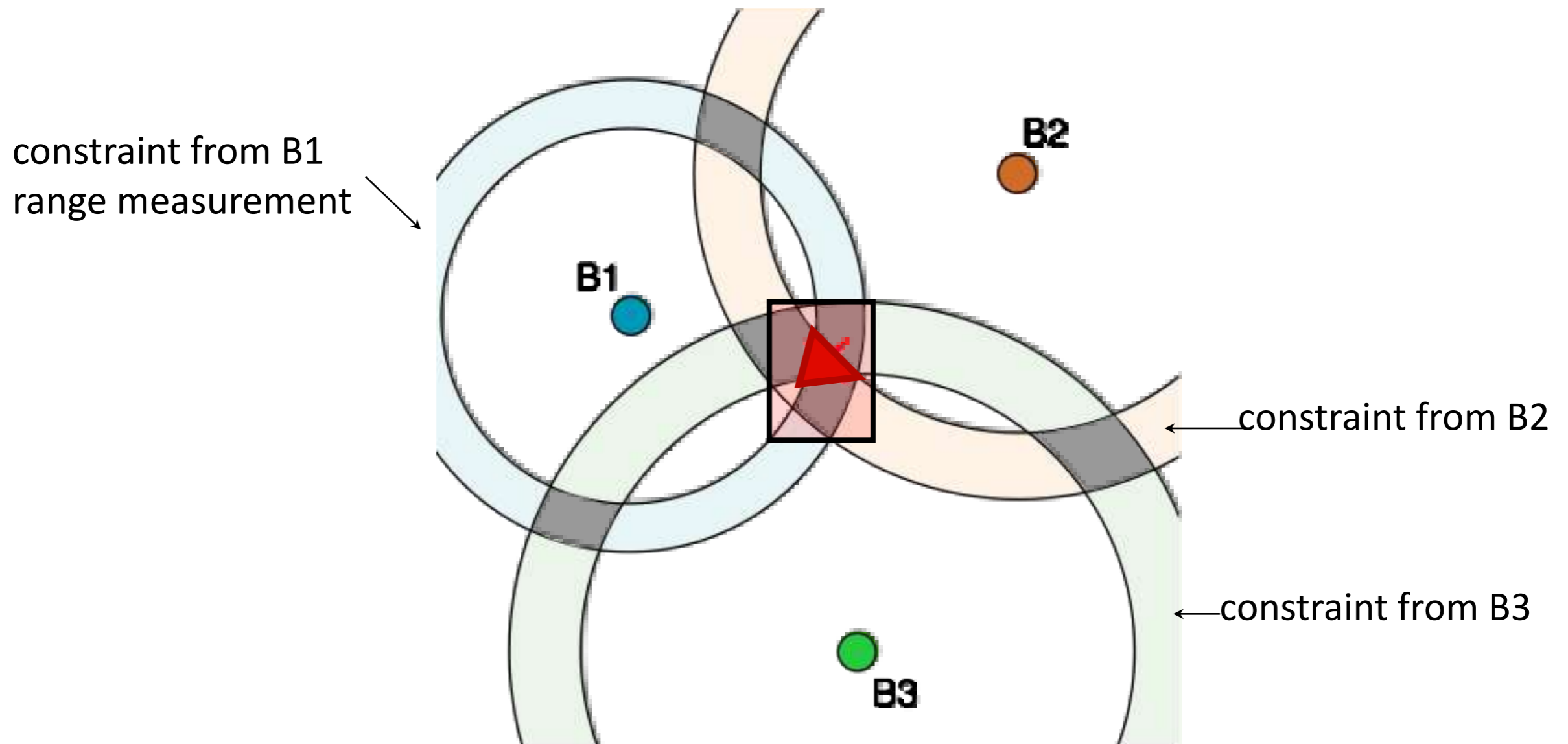
## Exemple simplifié en 2D : contraction



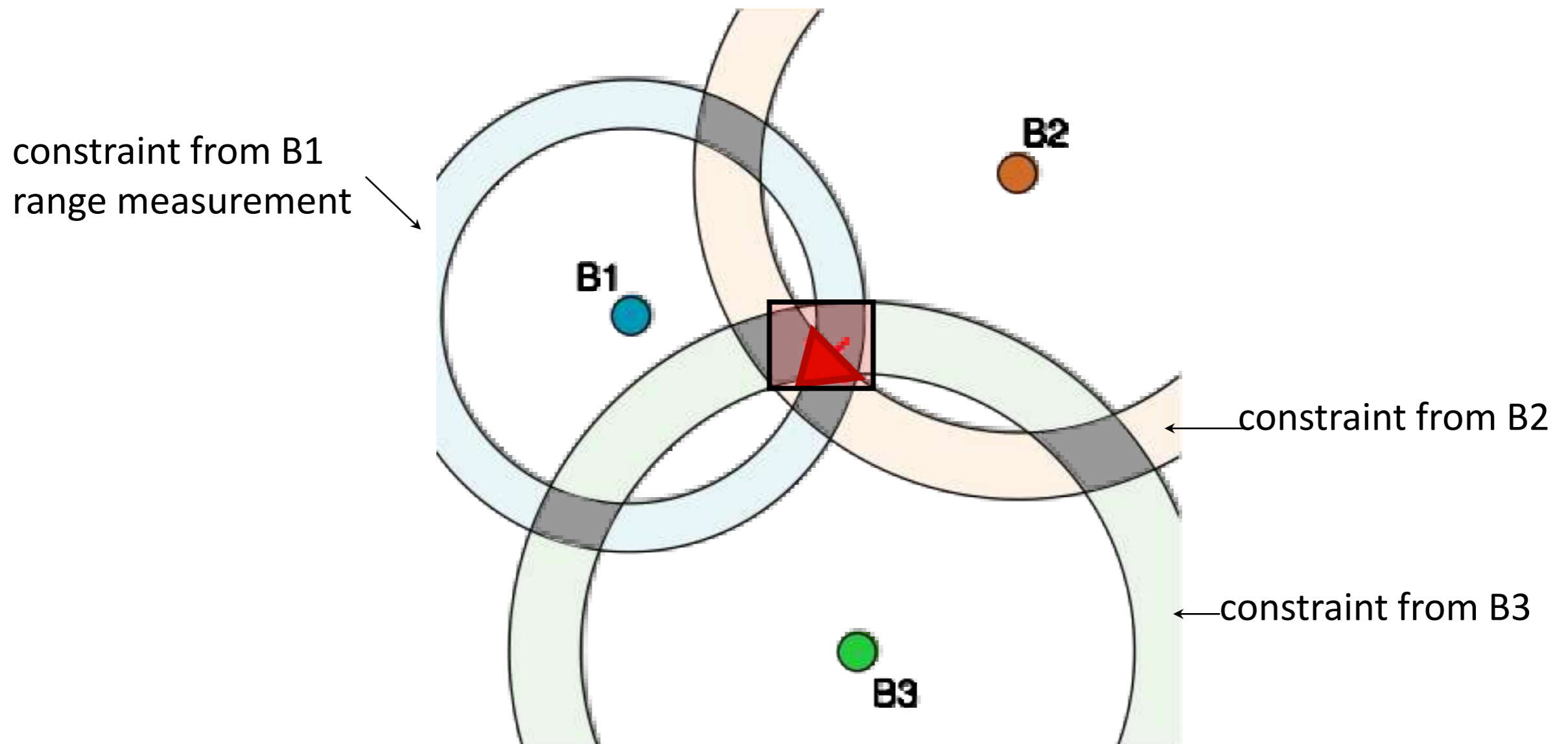
# Exemple simplifié en 2D : contraction



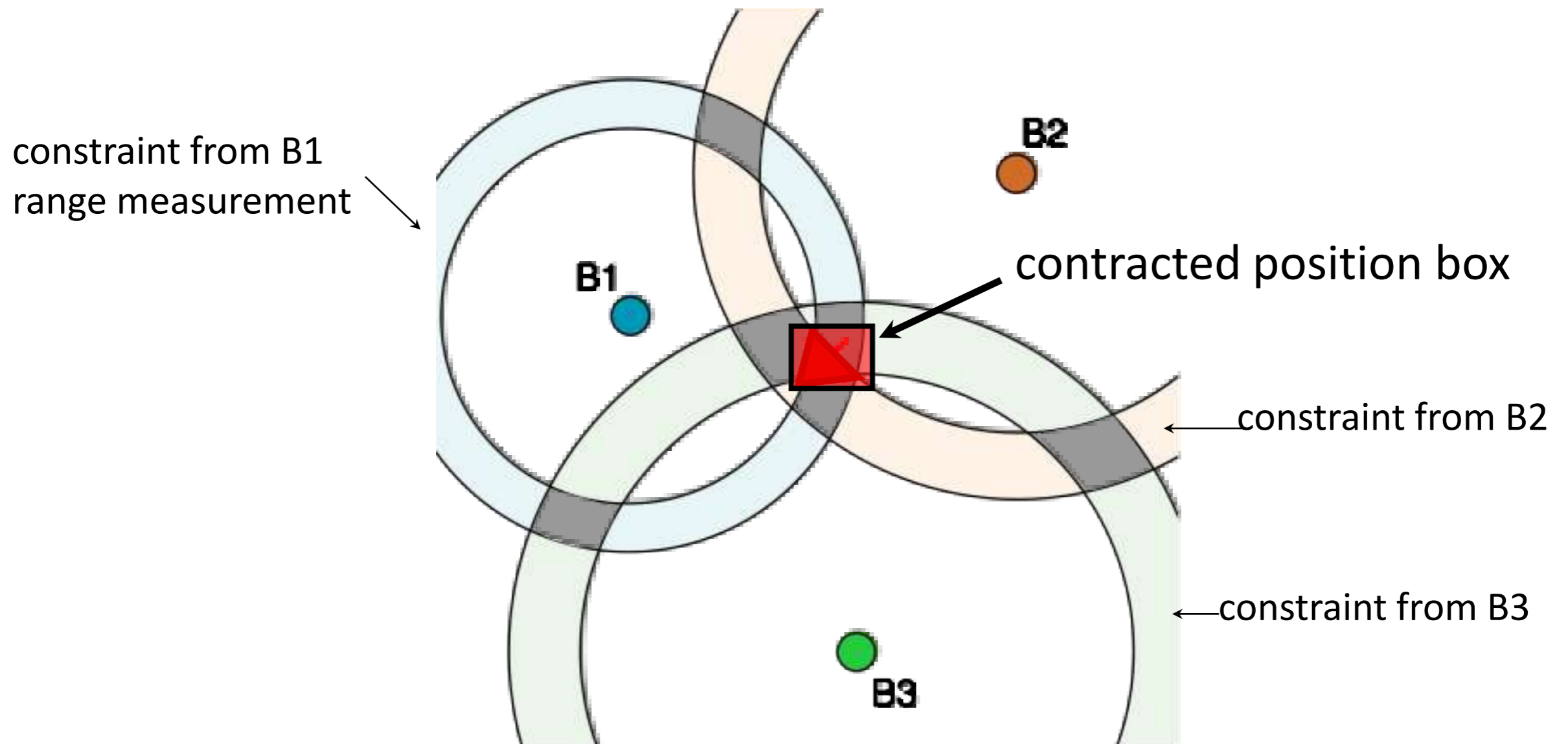
# Exemple simplifié en 2D : contraction



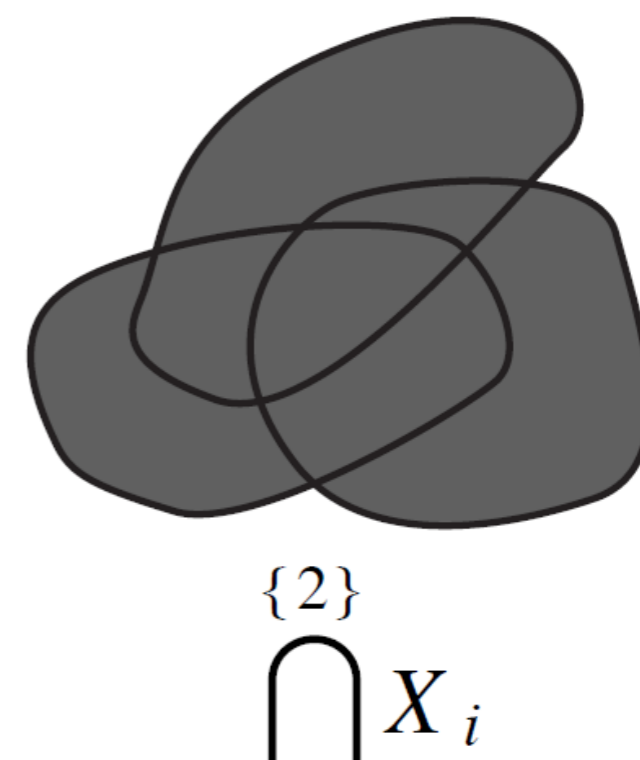
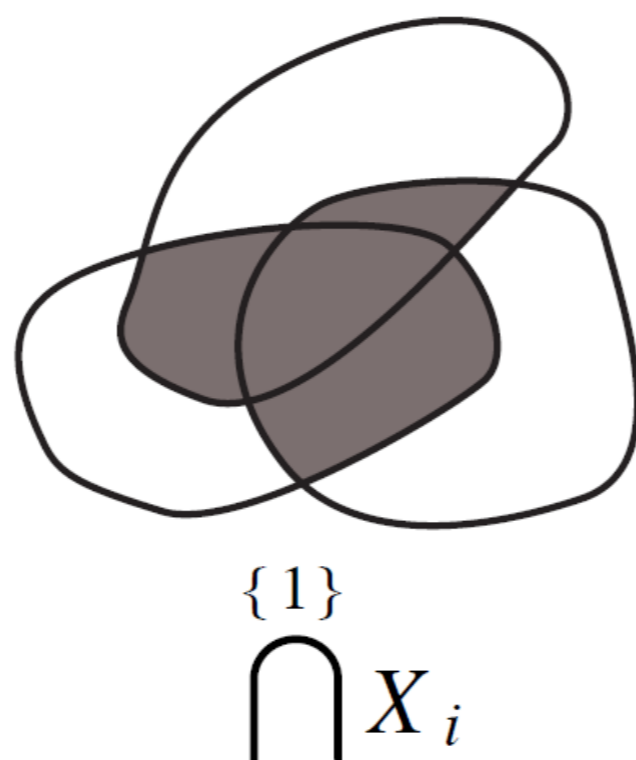
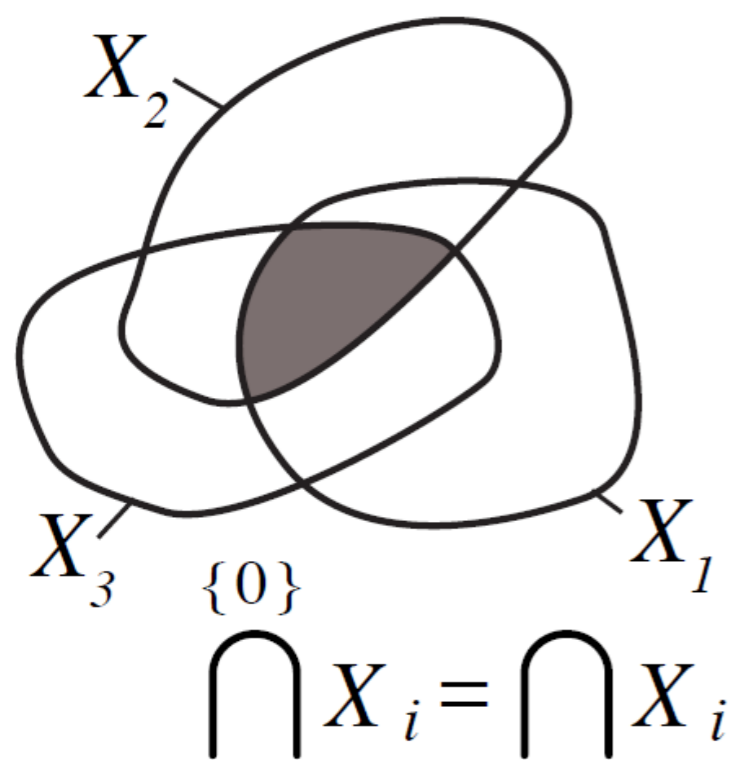
## Exemple simplifié en 2D : contraction



## Exemple simplifié en 2D : contraction

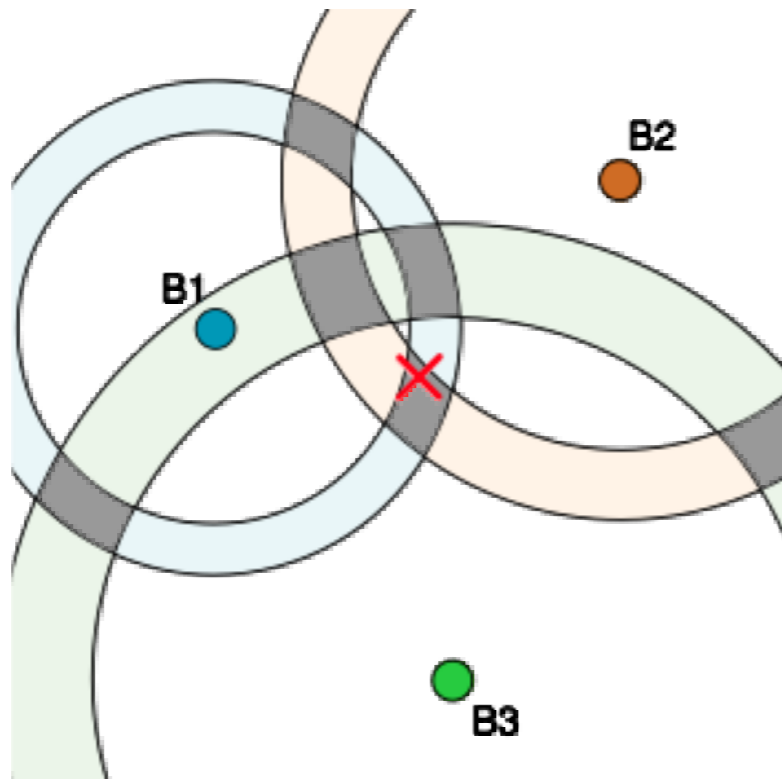


# Intersection q-relaxée

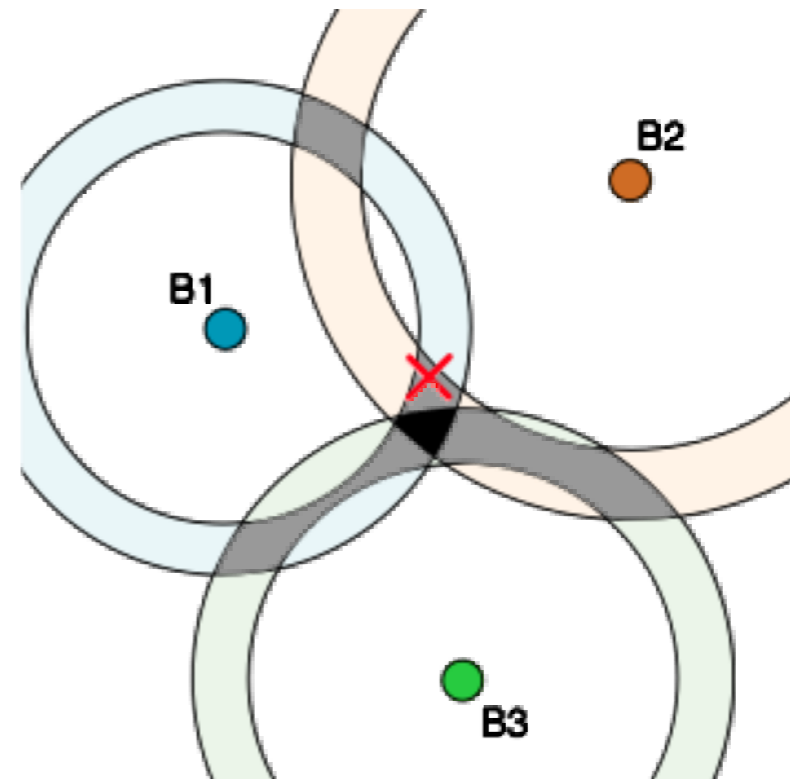


# Conséquences des mesures aberrantes

Solution vide



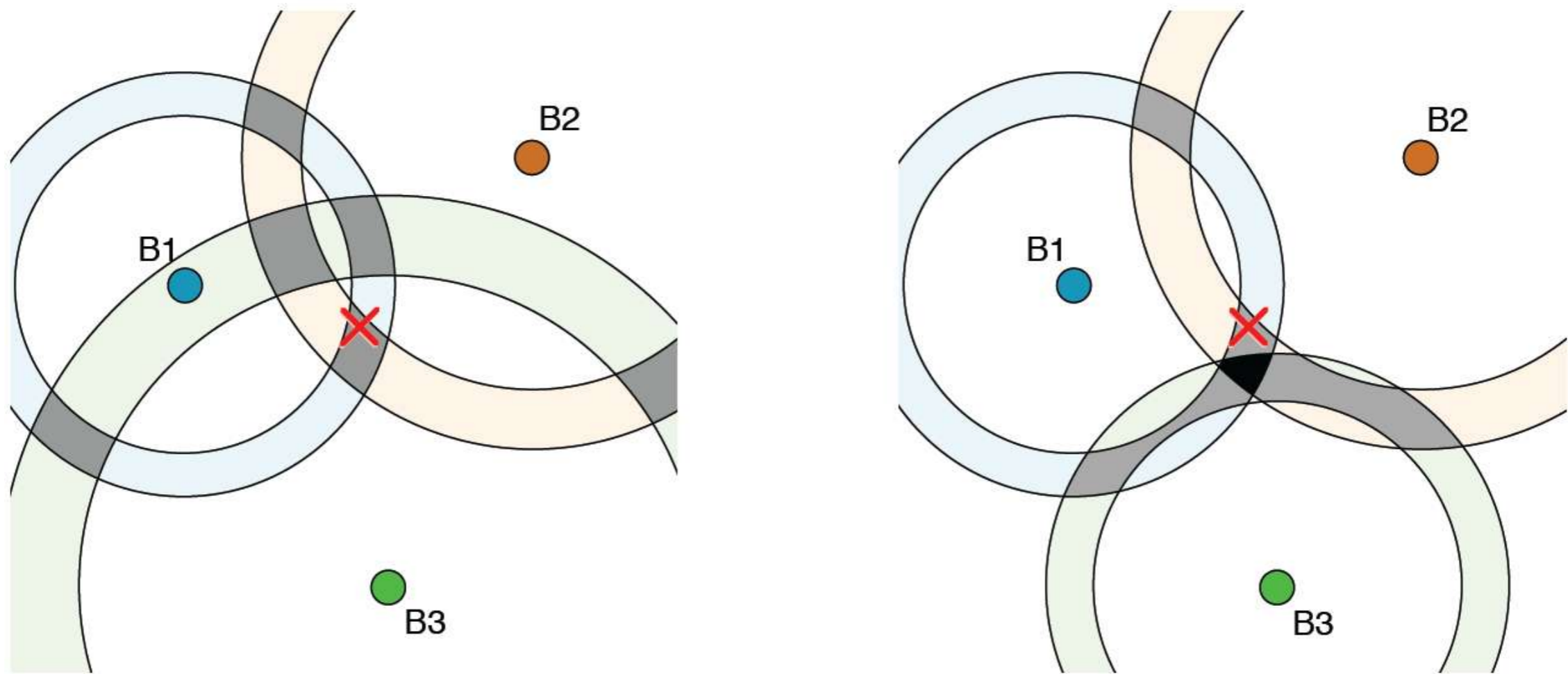
Solution erronée



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



# Robustesse aux mesures aberrantes : relaxation de contraintes

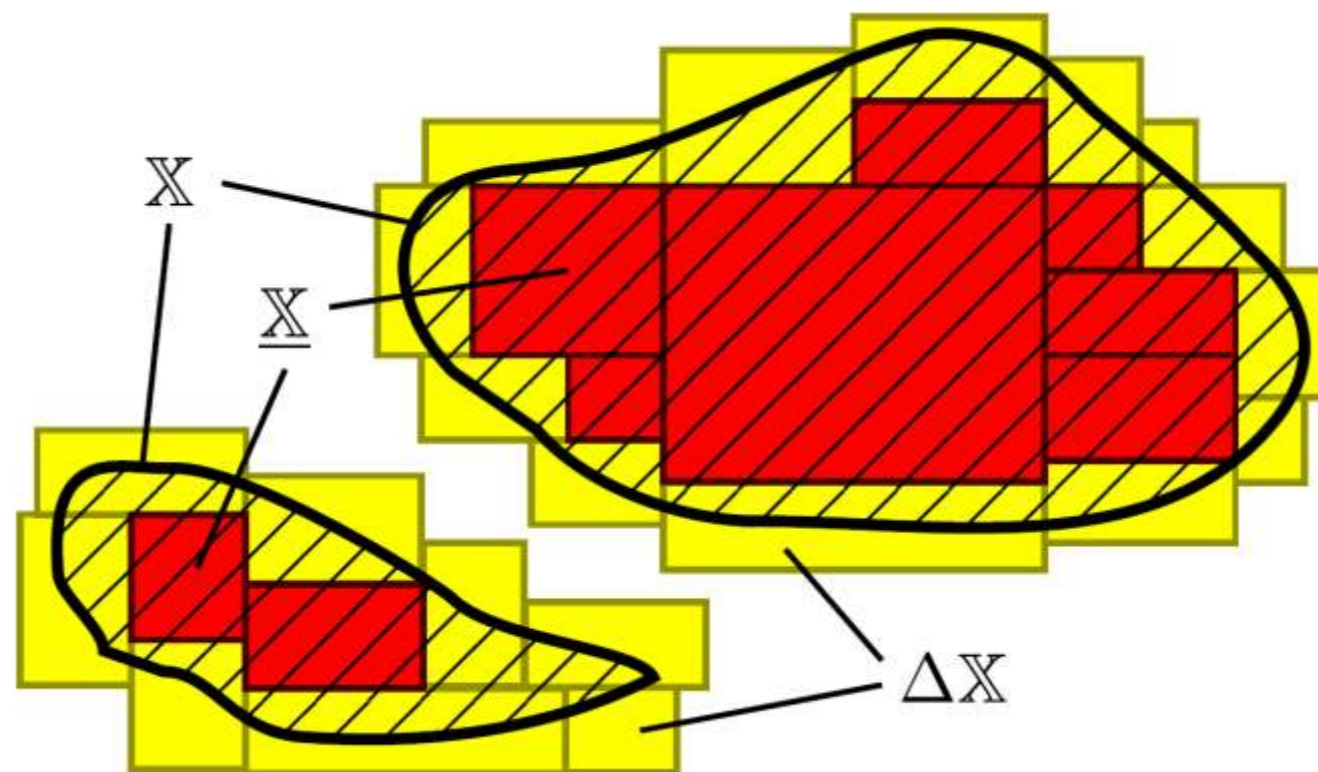


Robustesse : Intersection *d'au moins  $m-q$*  contraintes.  
-> intersection q-relaxée

# Sous-pavages

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

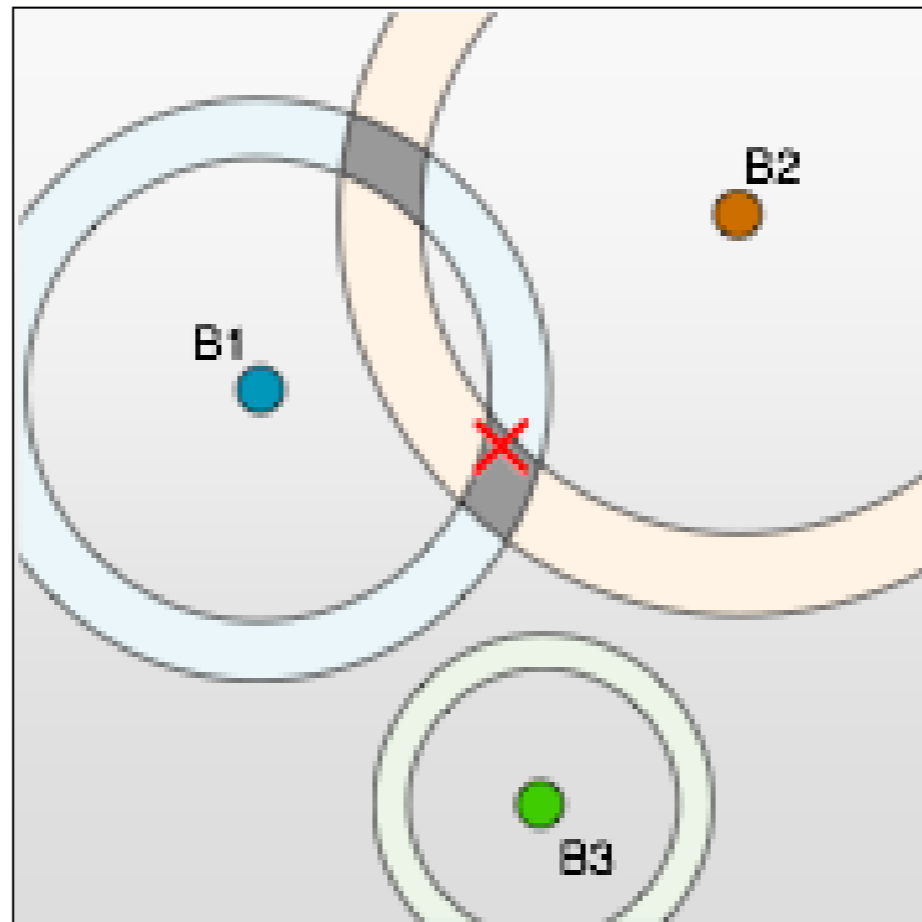
Les sous-pavages permettent de représenter des ensembles quelconques

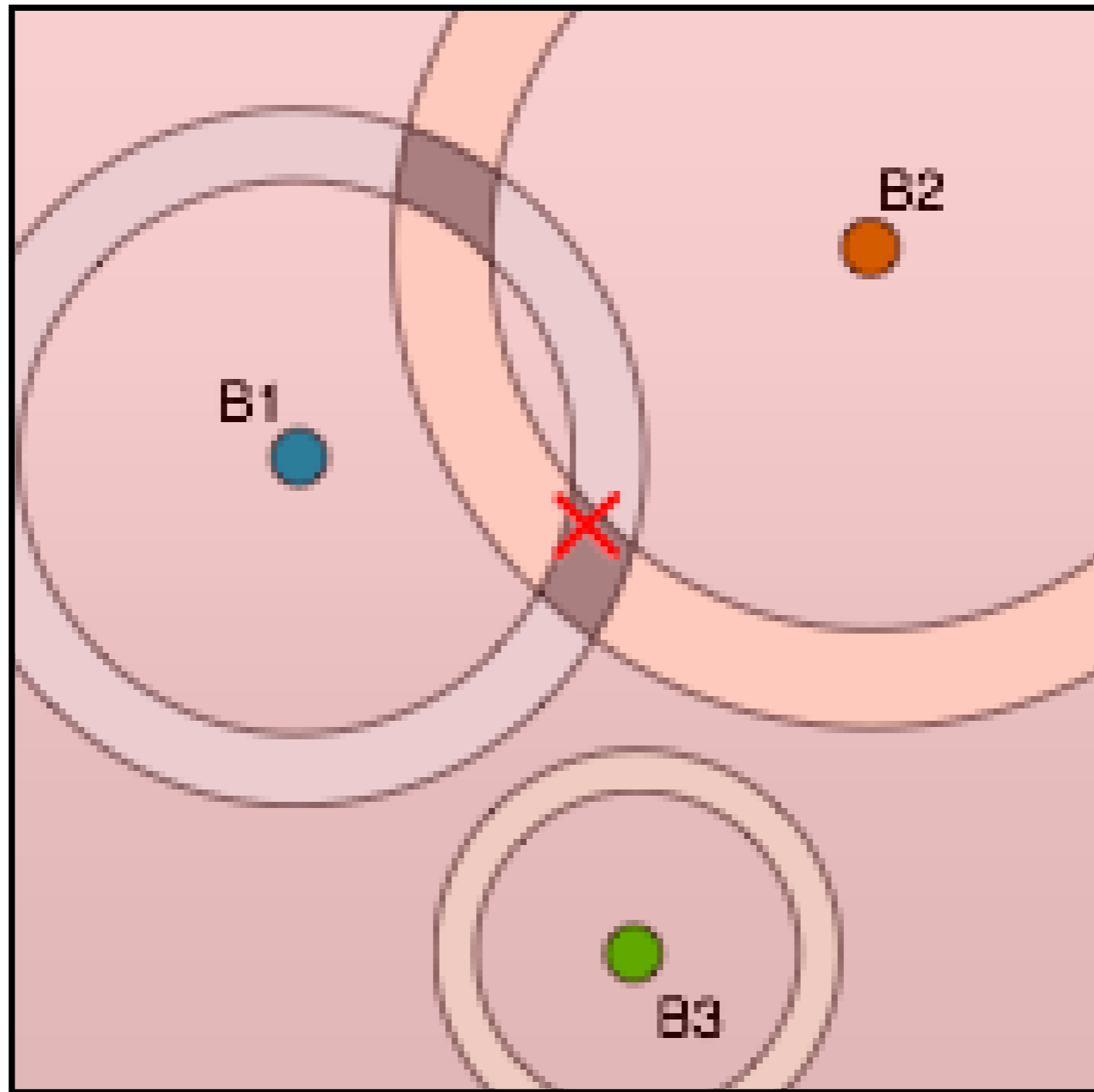


[Jaulin et al, 2001] Applied Interval Analysis

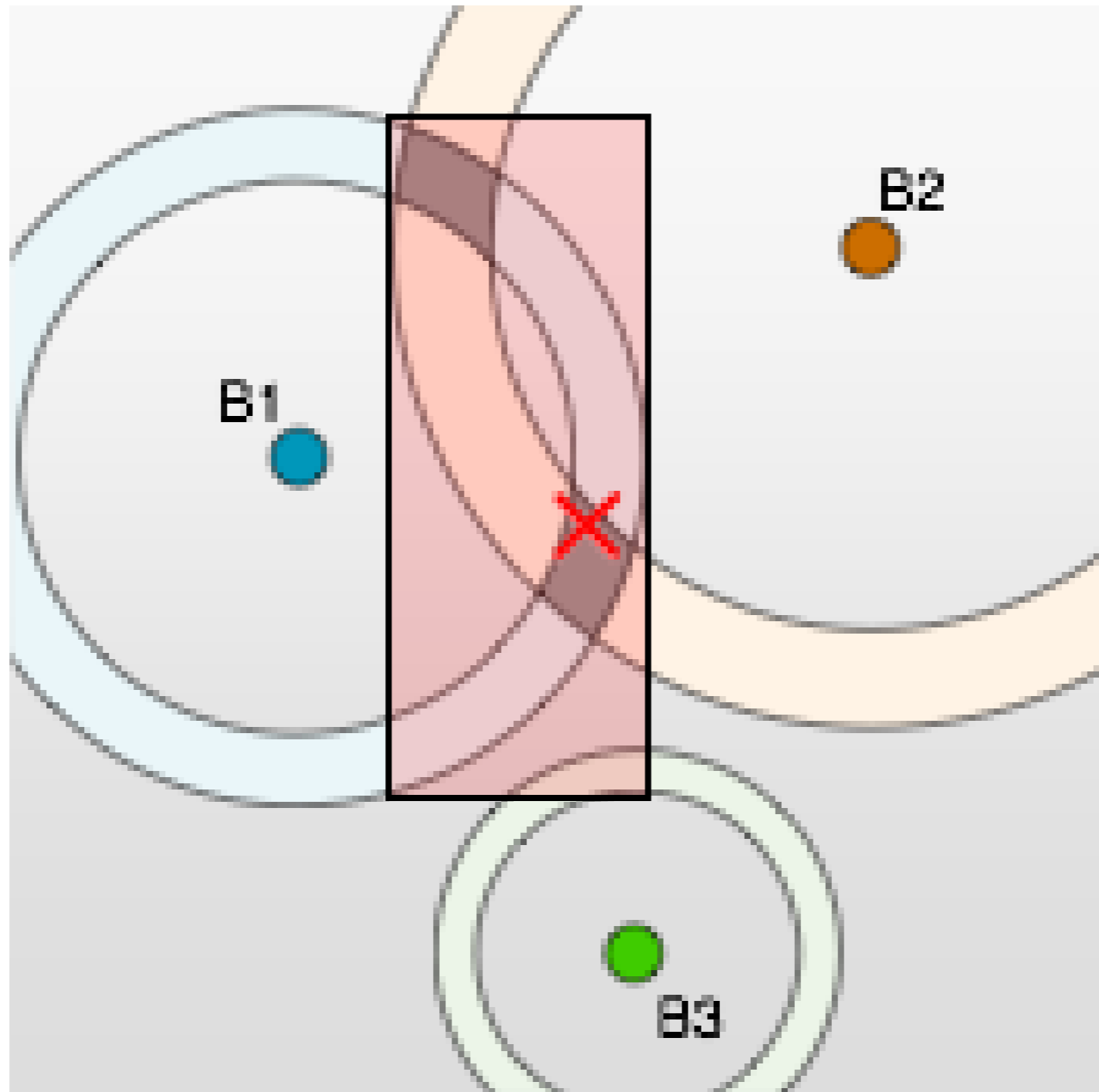
# SIVIA : Set Inversion via Interval Analysis

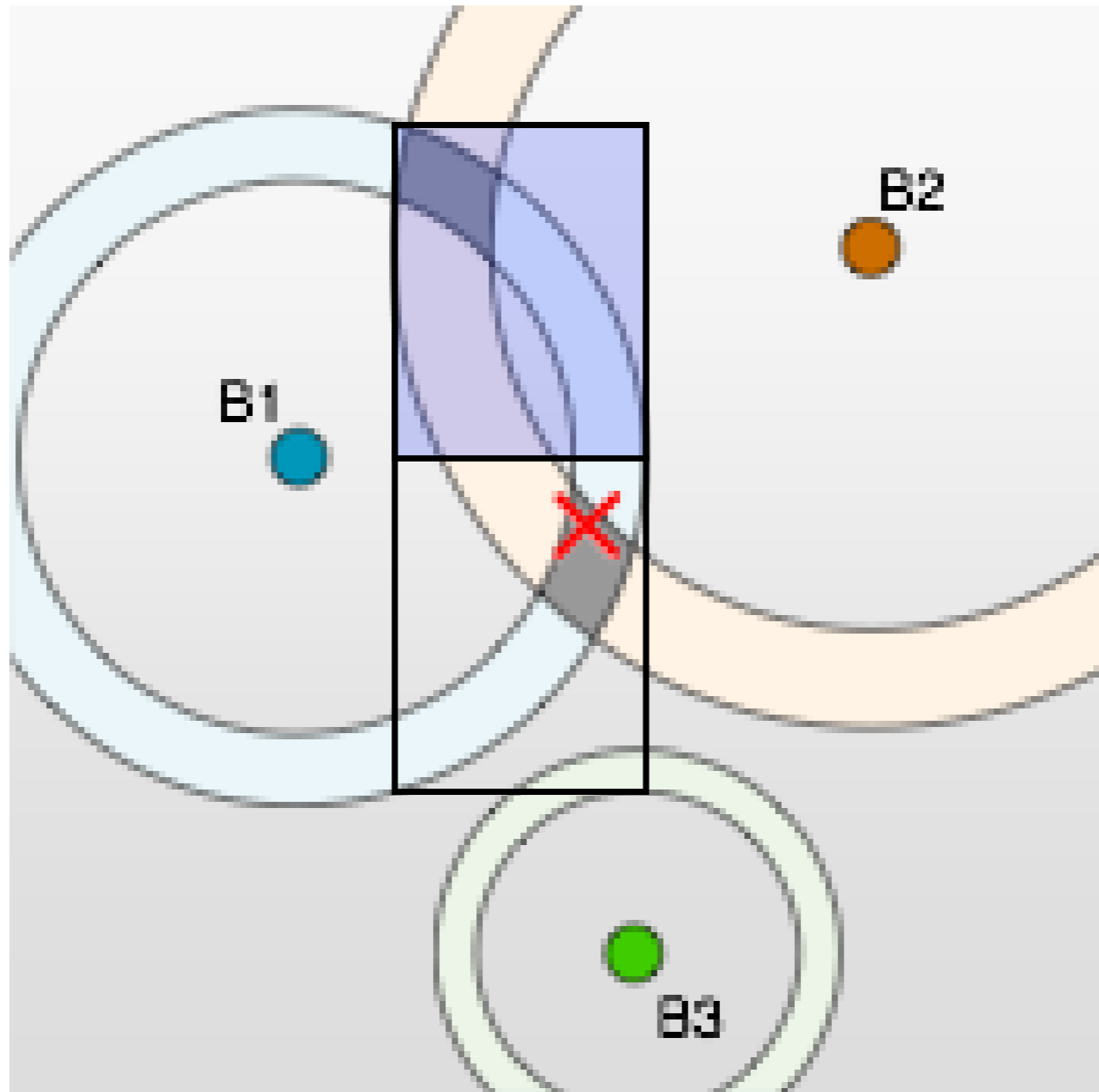
- Contractions et bisections successives d'une boîte initiale
- Exemple: solution 1-relaxée

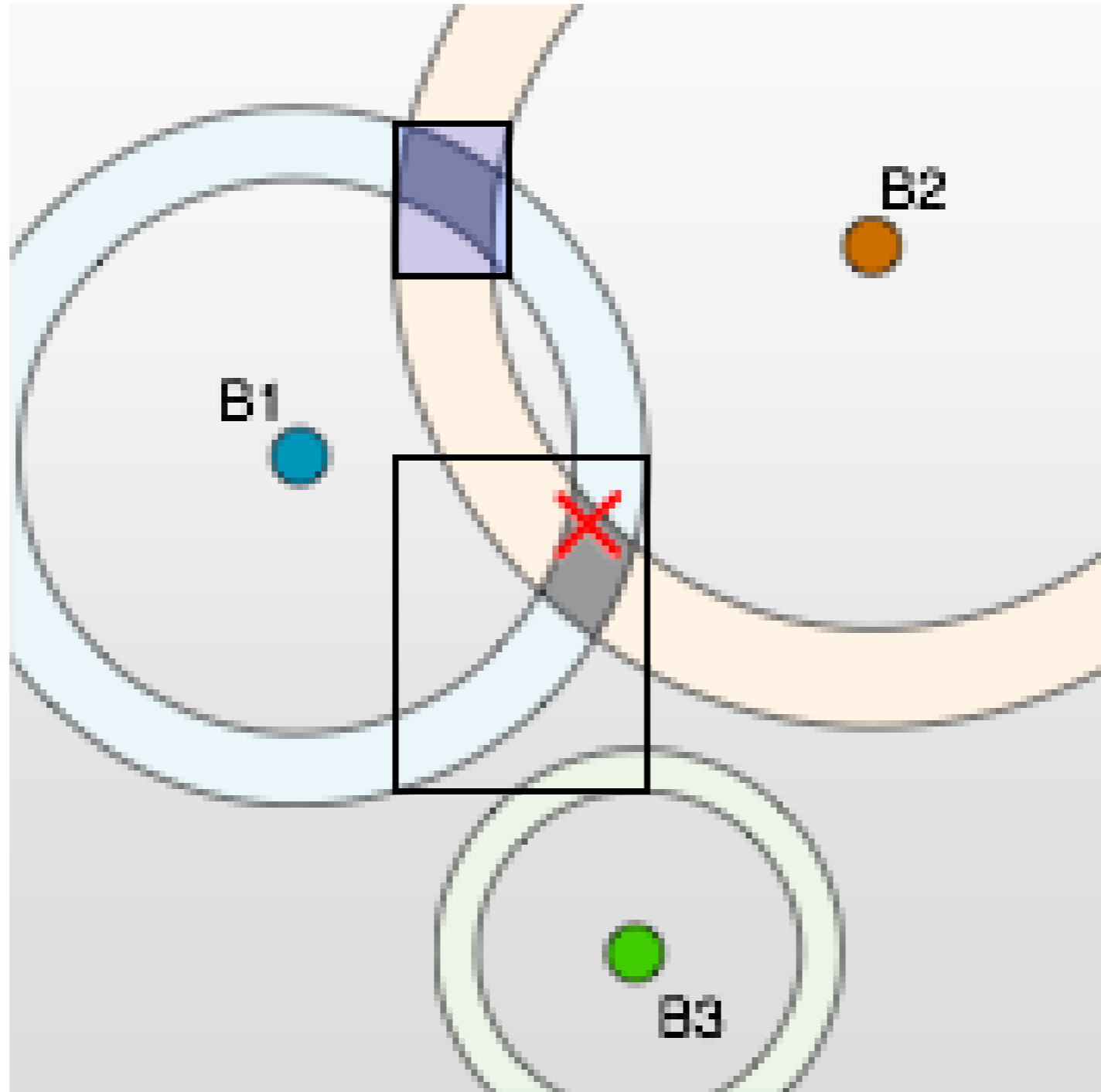


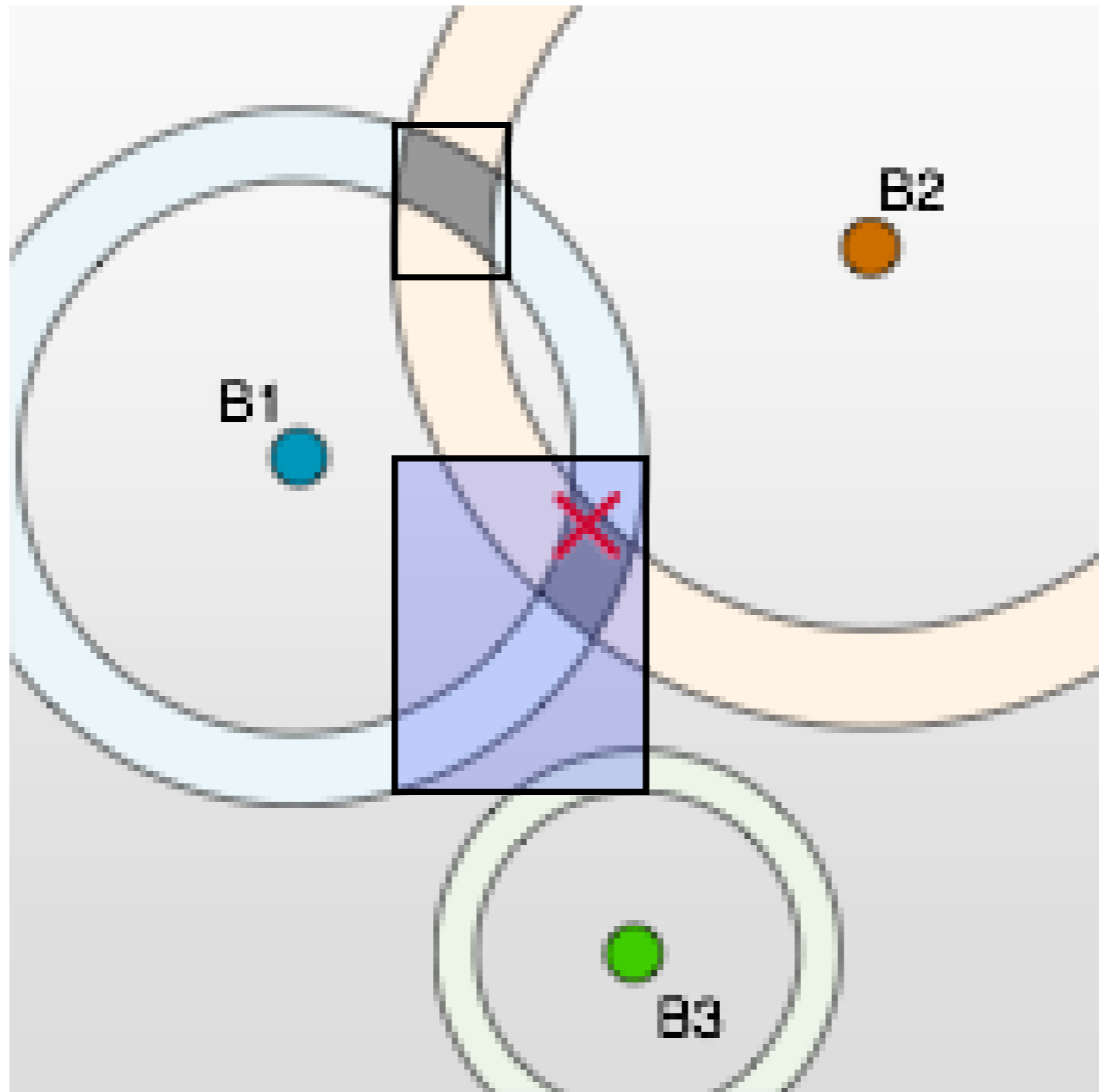


Boîte initiale (arbitrairement grande)

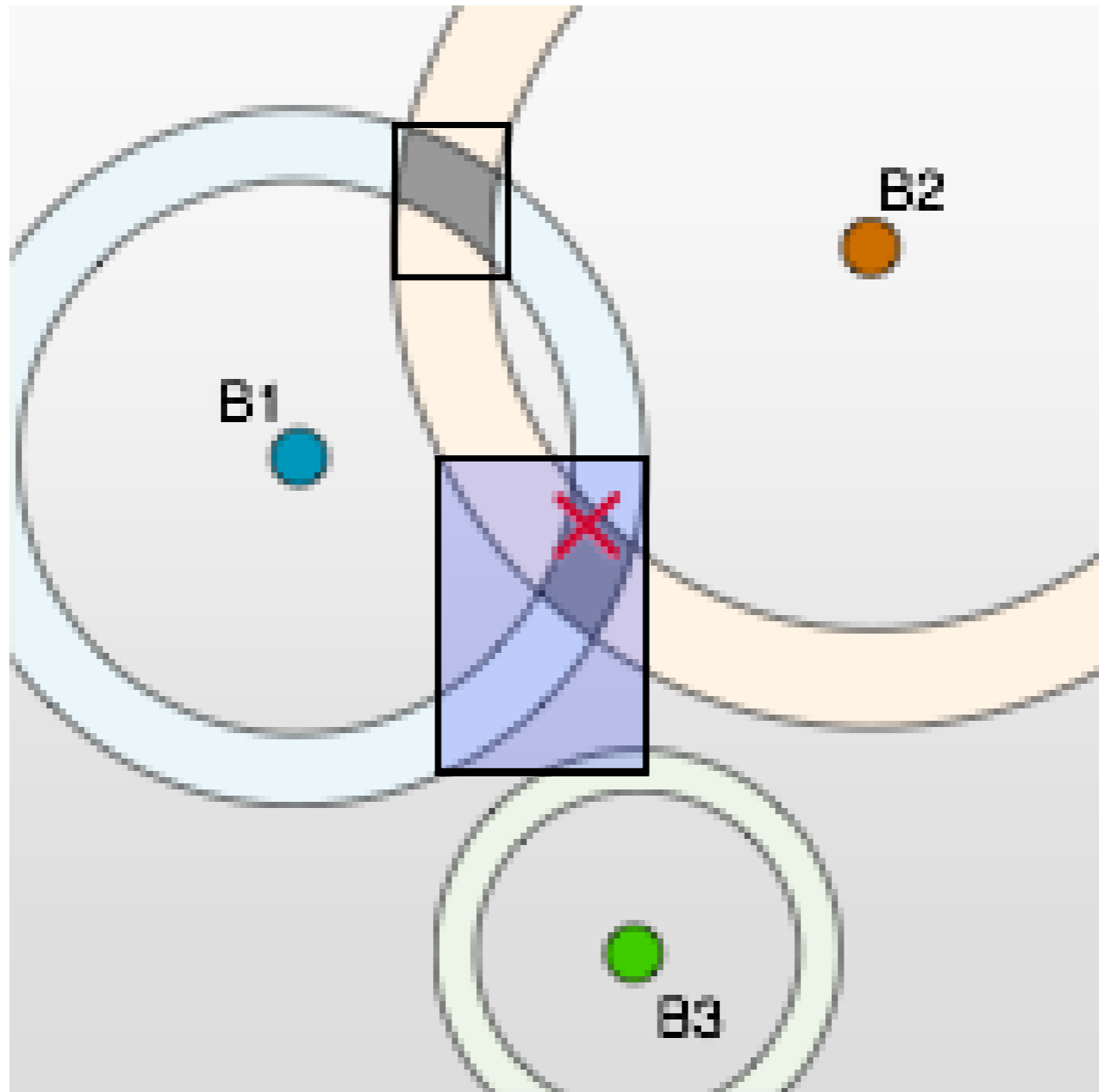


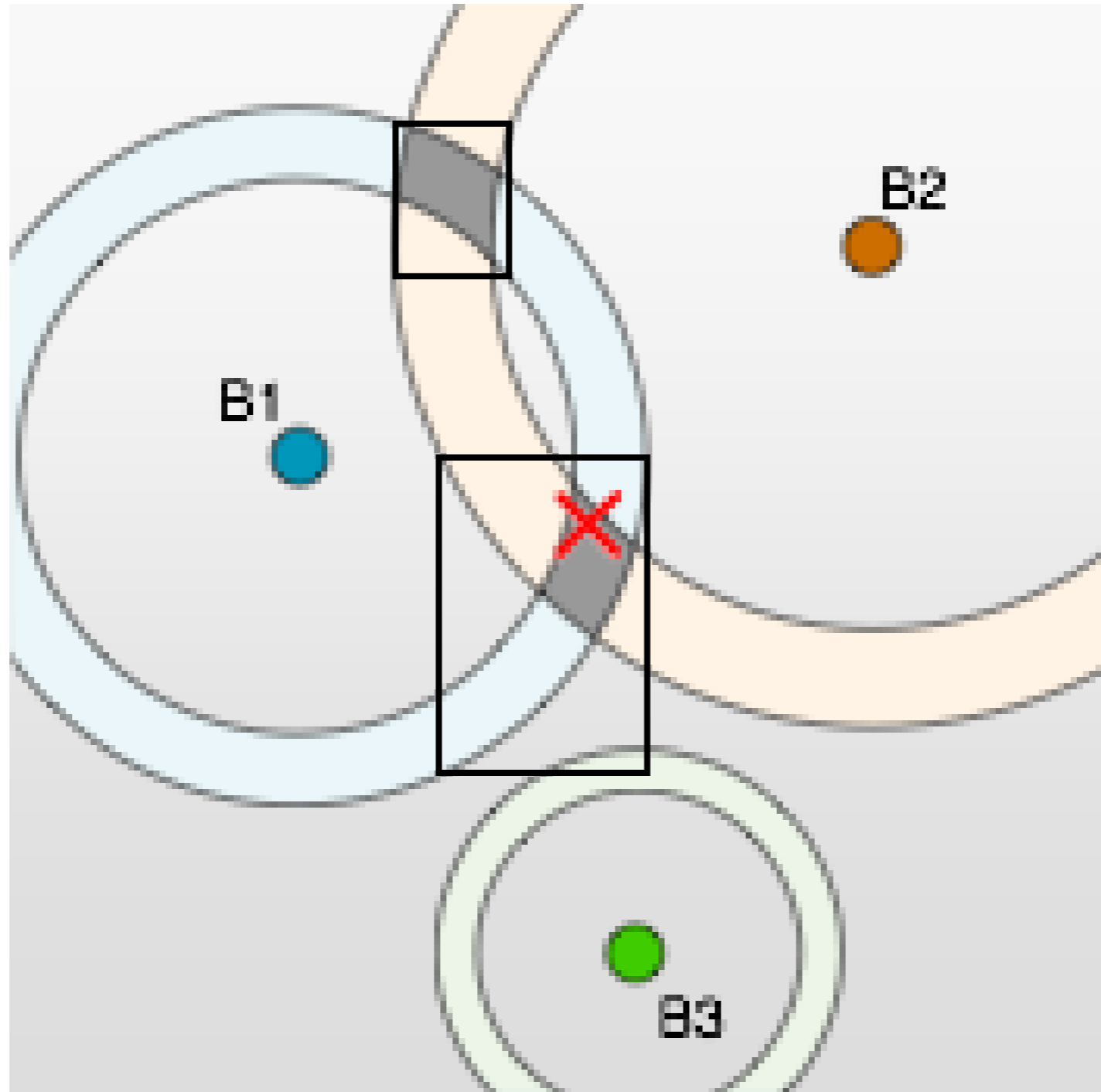


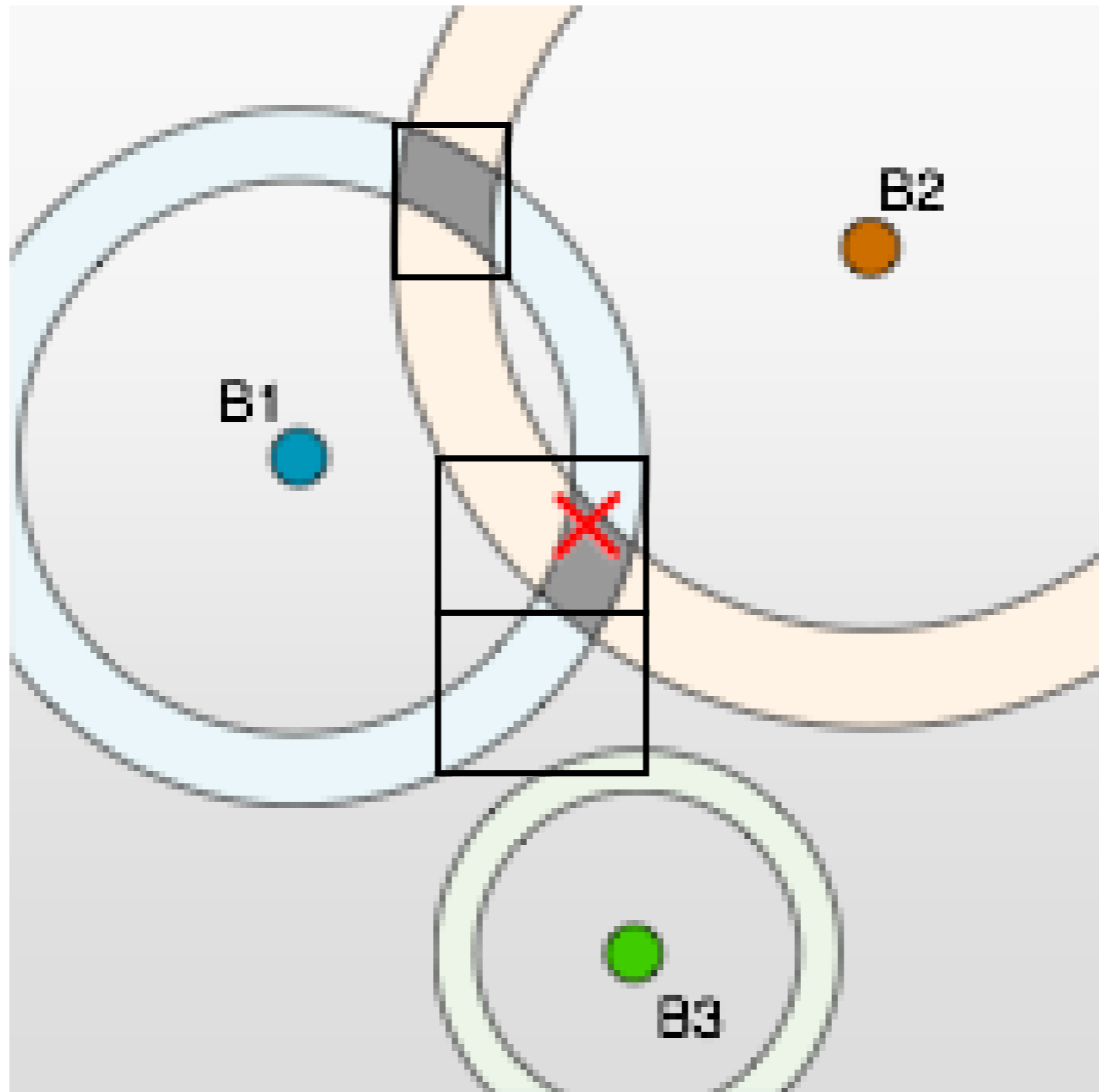


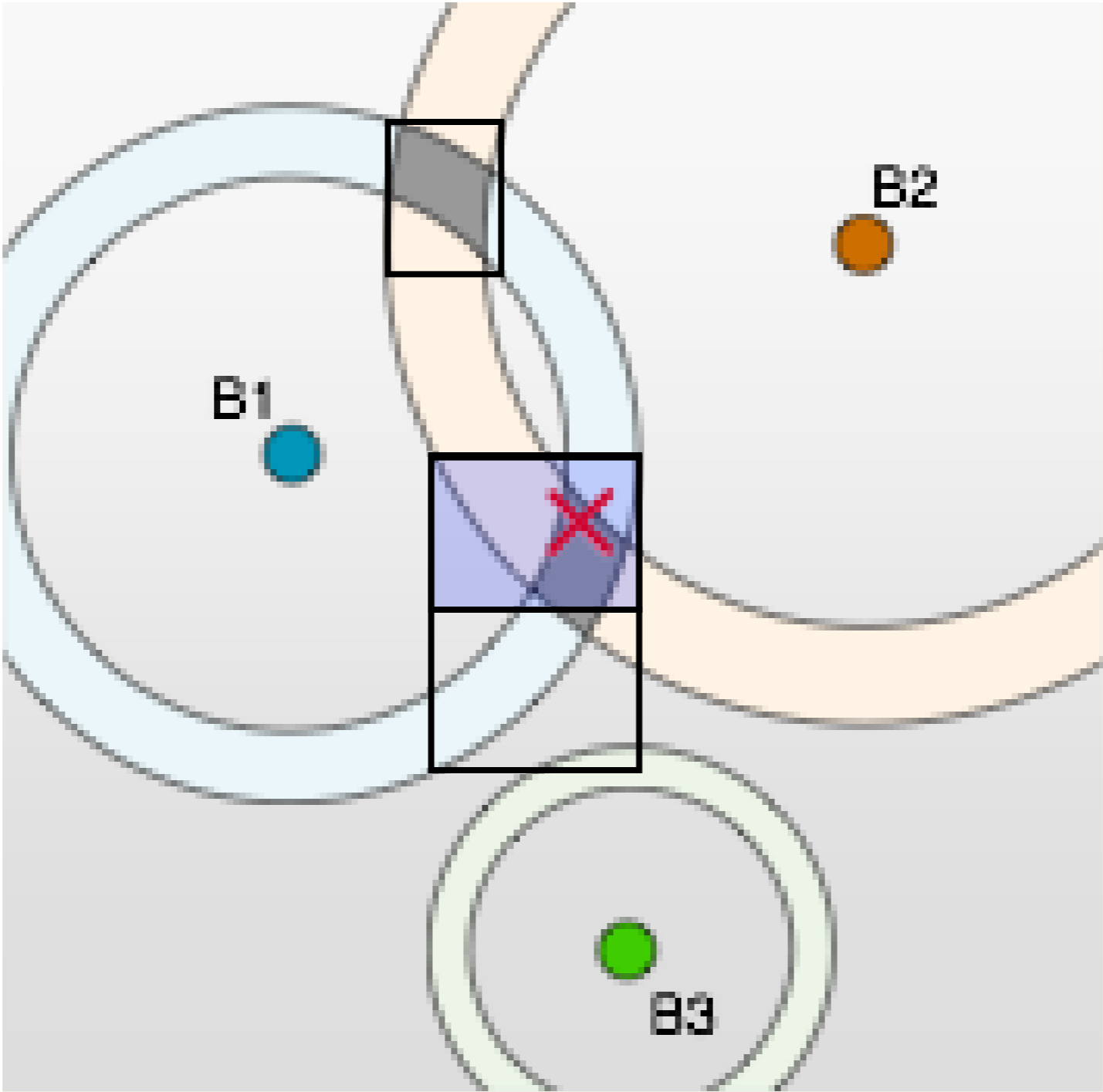


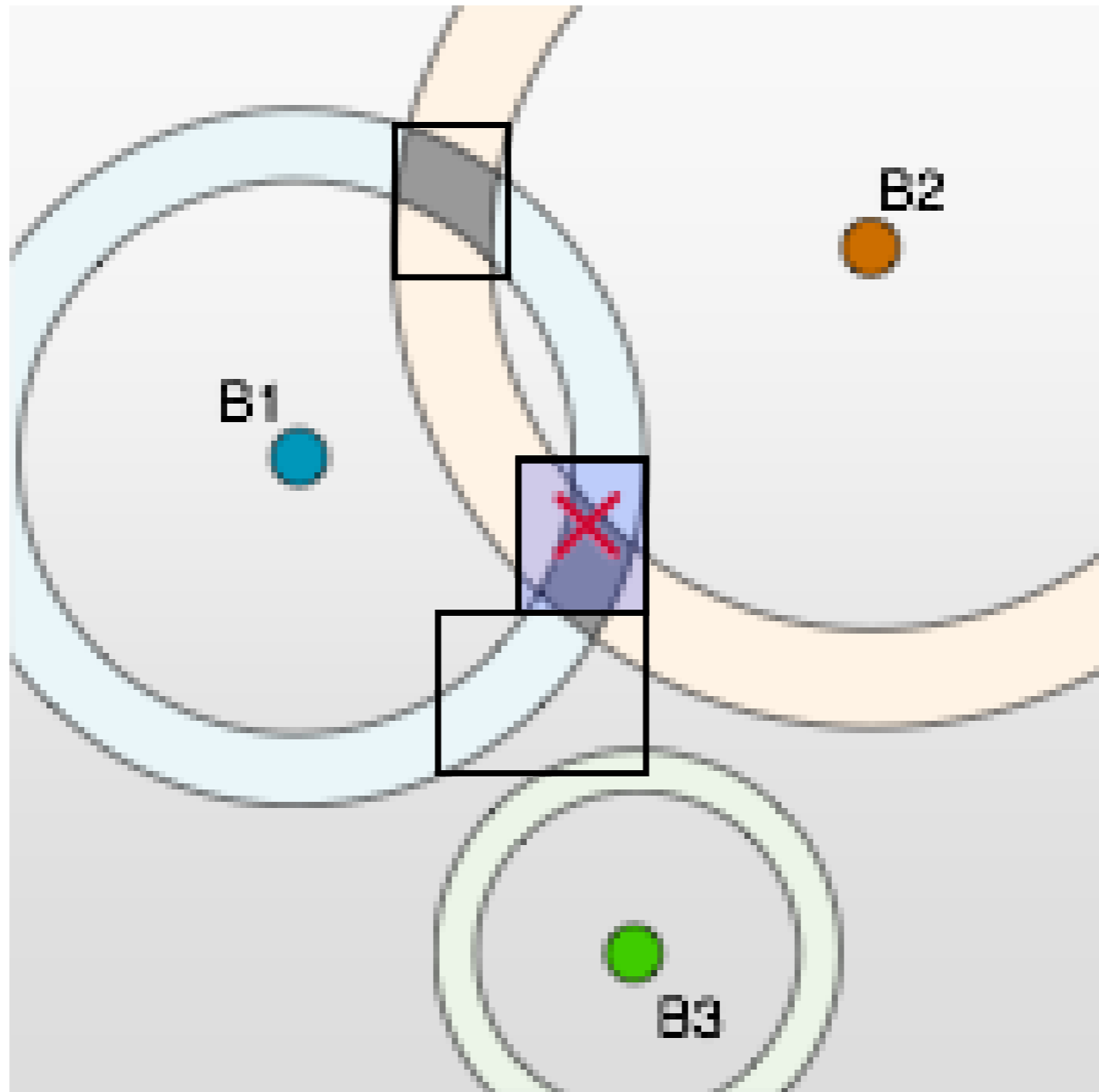


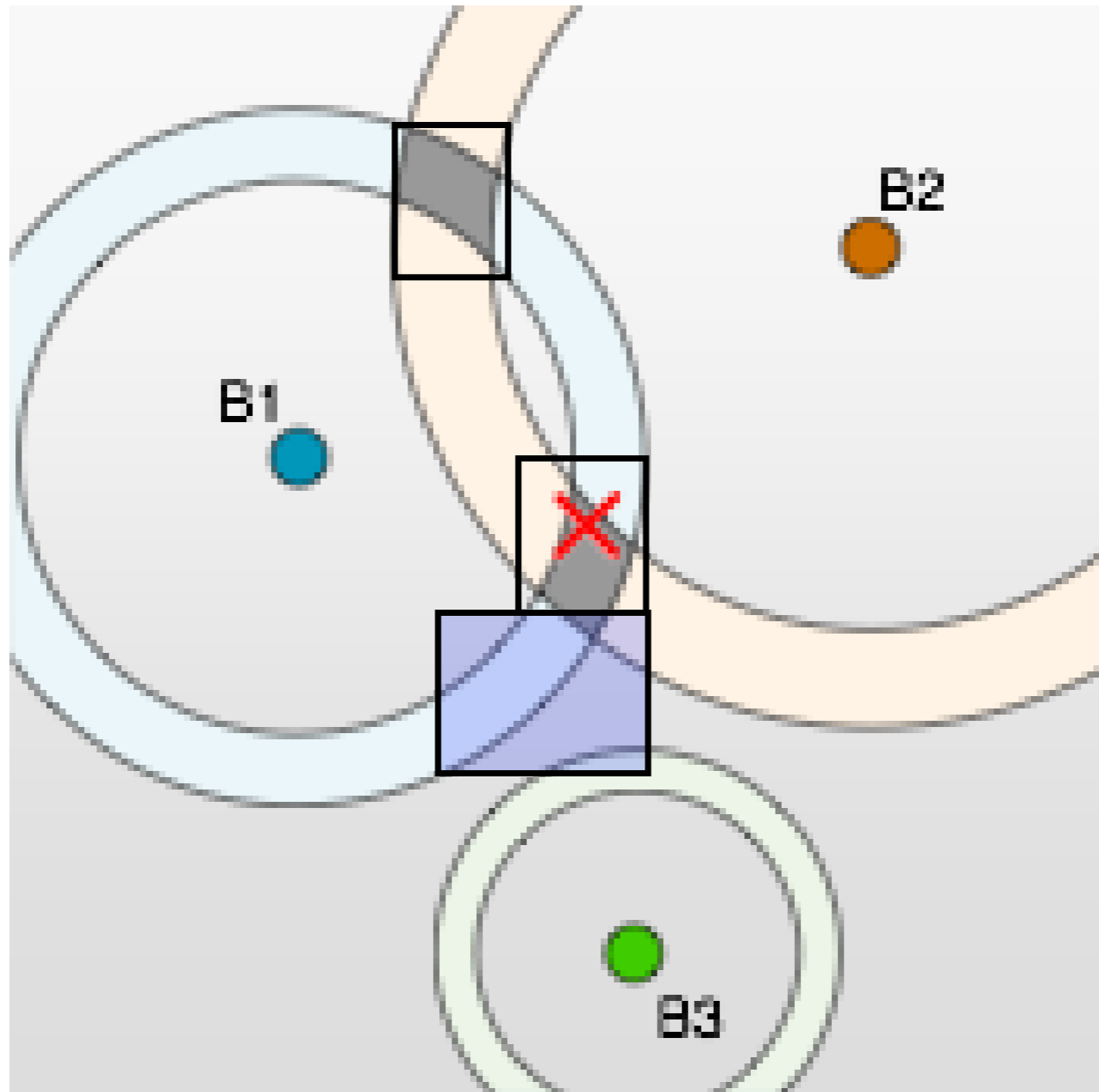


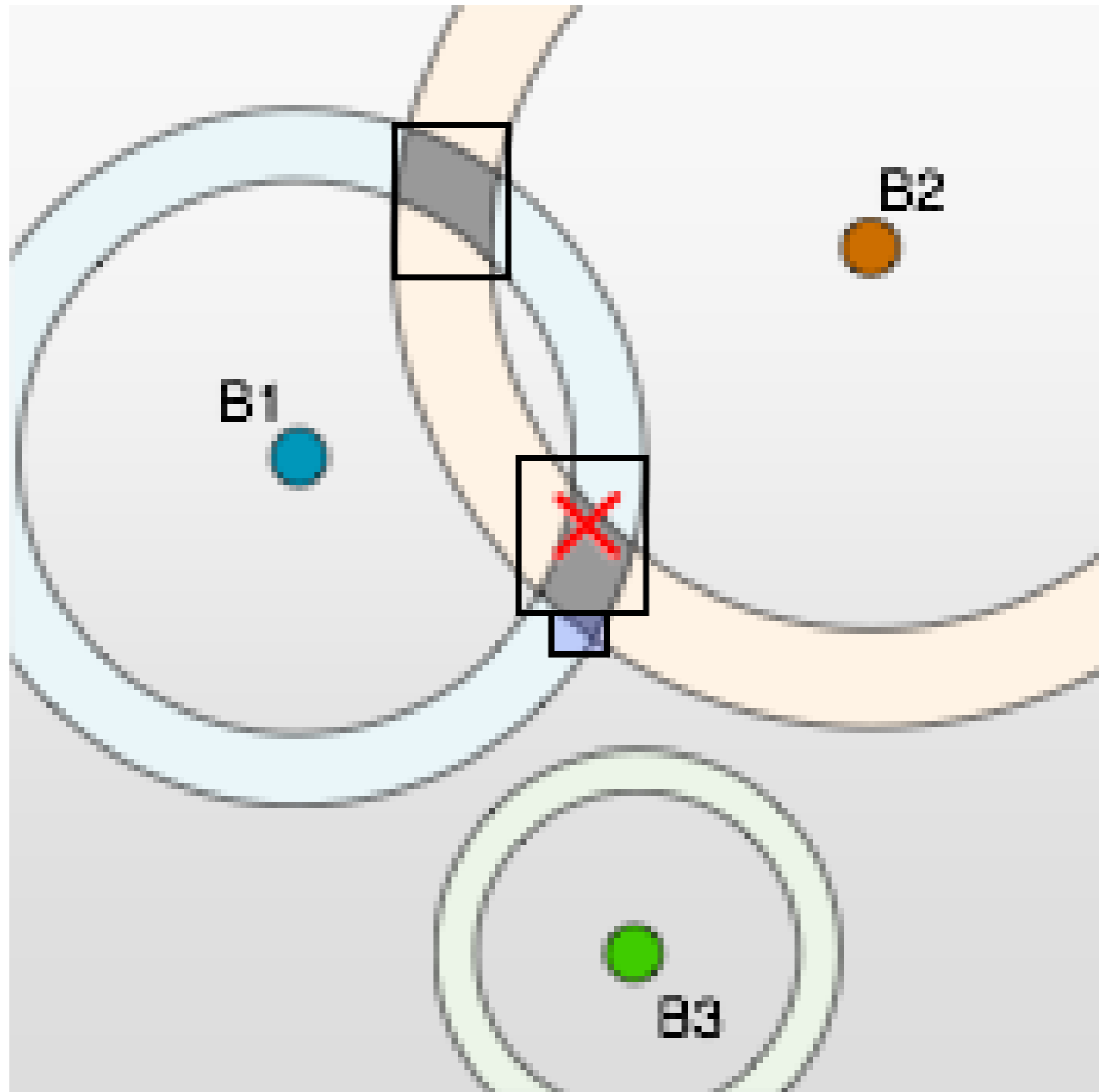


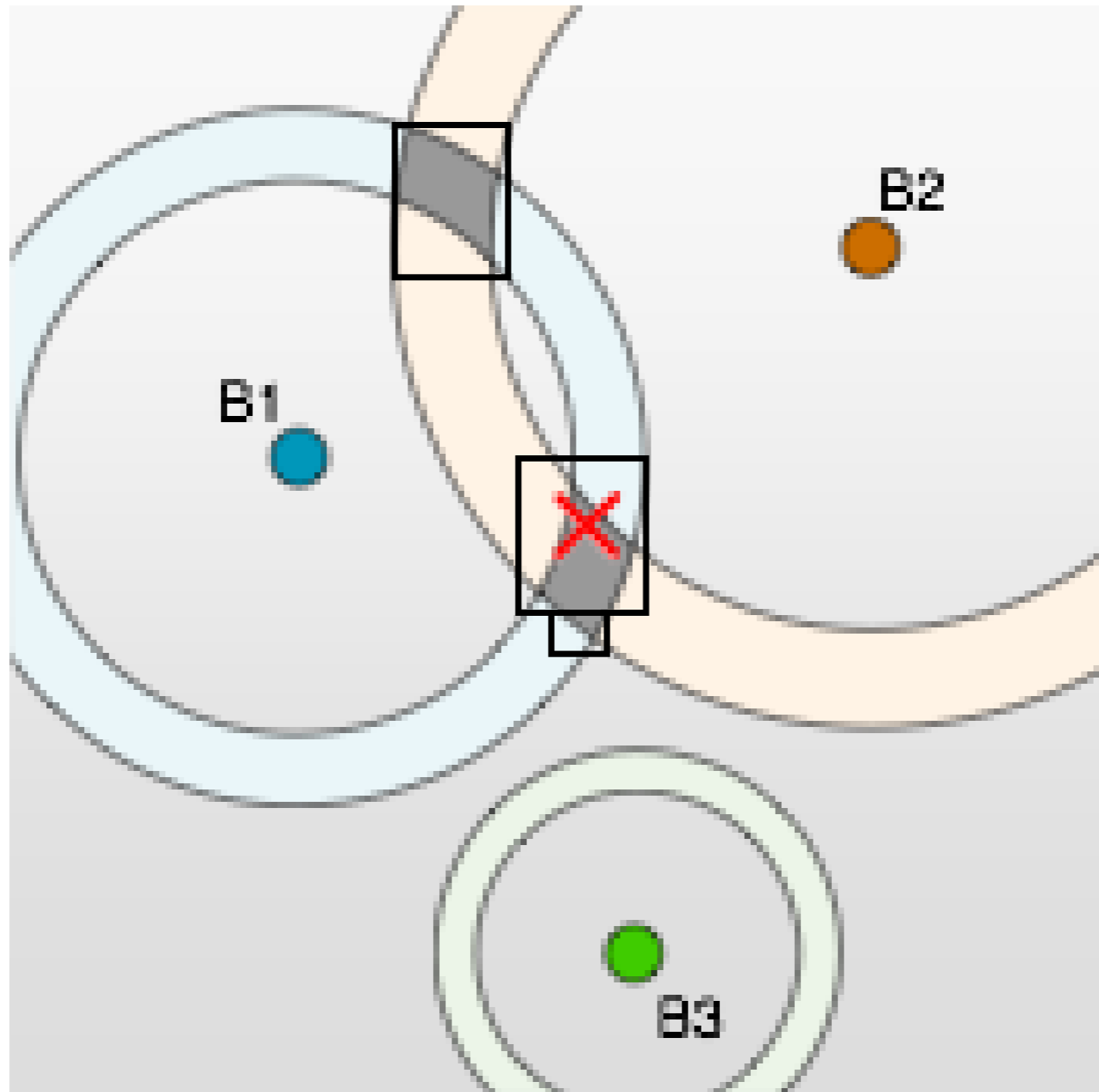




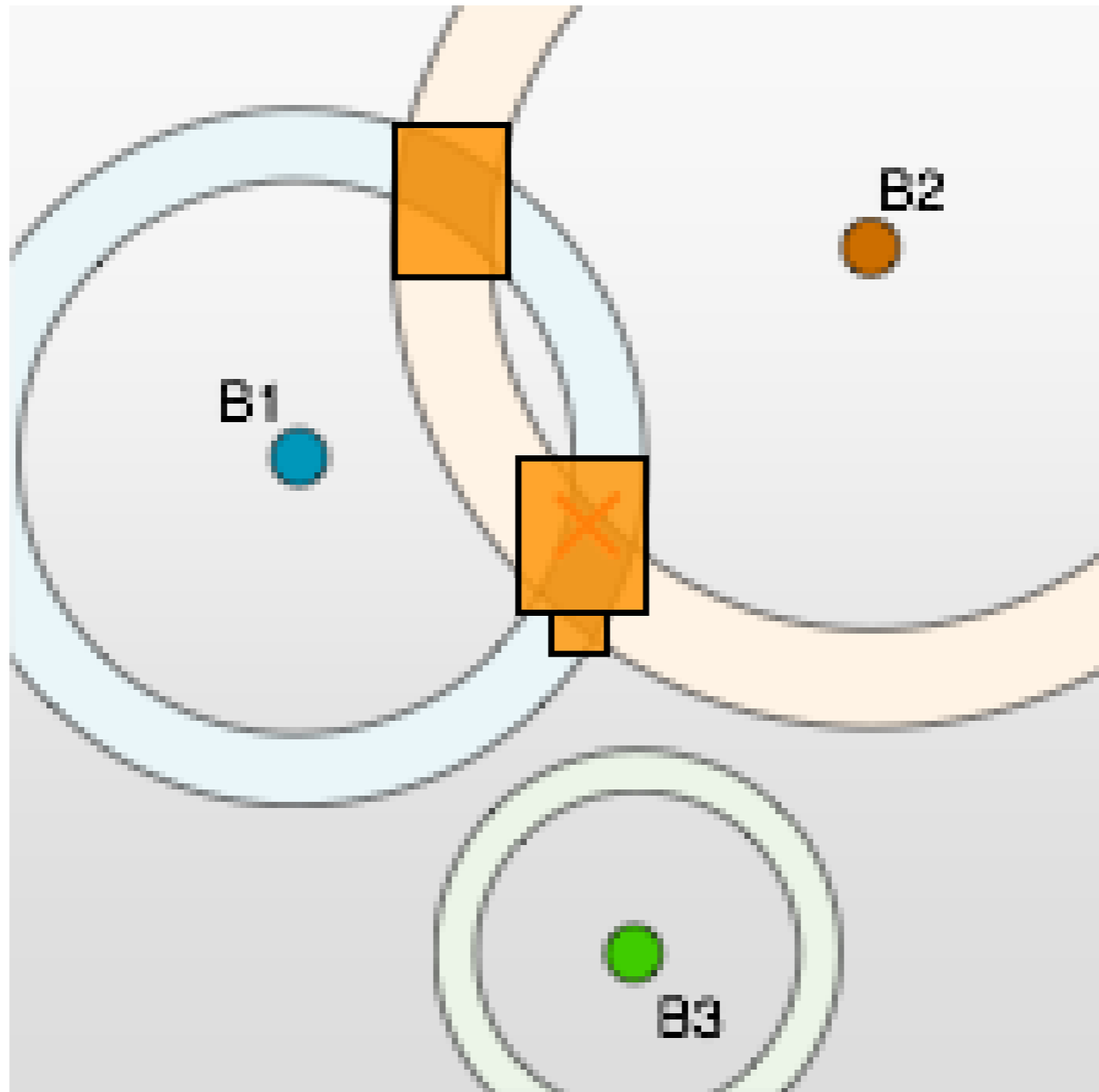






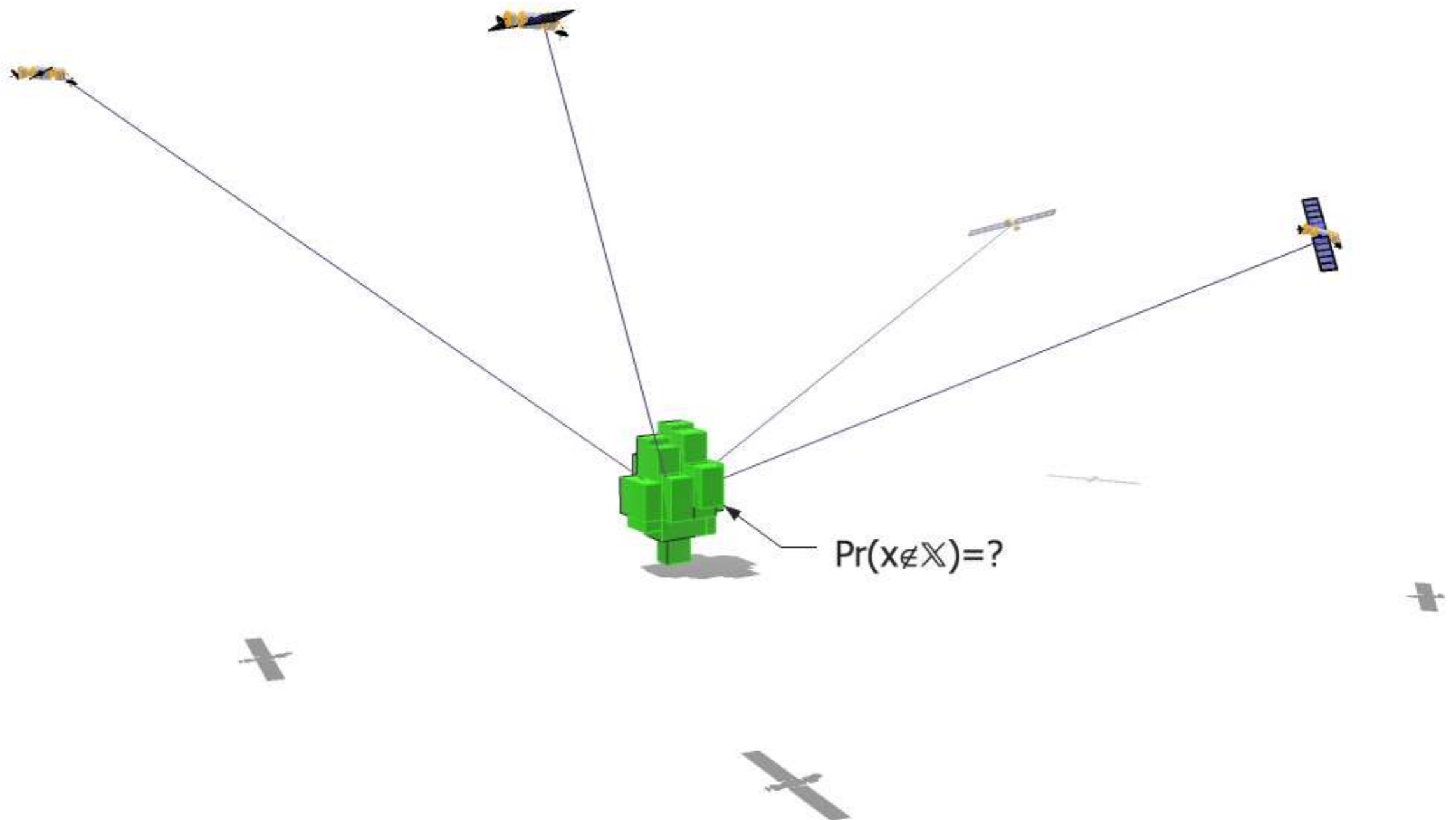






# Calcul du risque

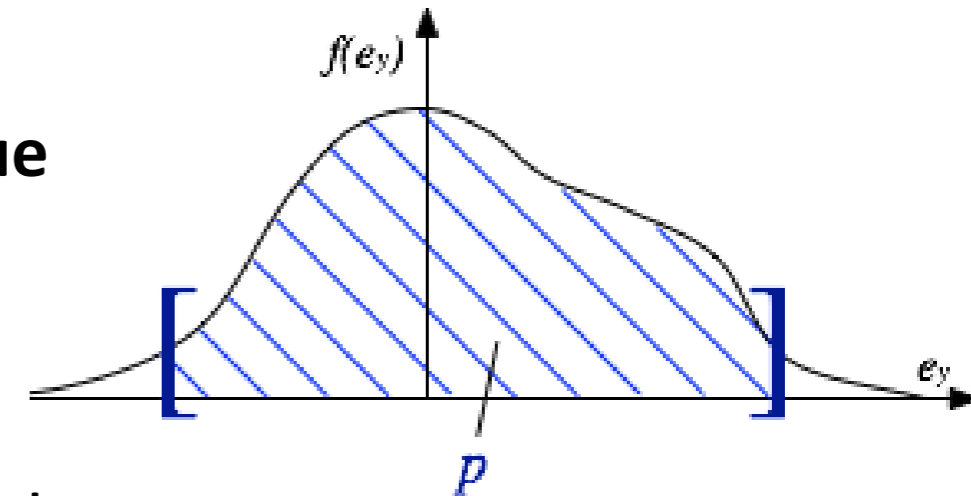
On cherche le risque associé *a priori* à la solution de localisation



## 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

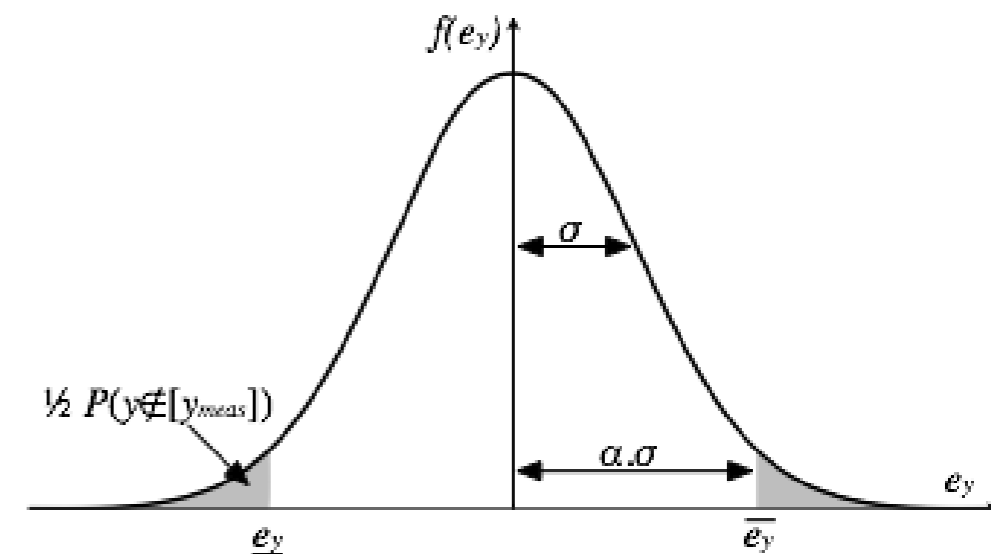
$$r_{max} = 1 - \sum_{k=m-q}^m \binom{m}{k} p^k (1-p)^{m-k}$$

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

- exemple dans le cas Gaussien

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

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



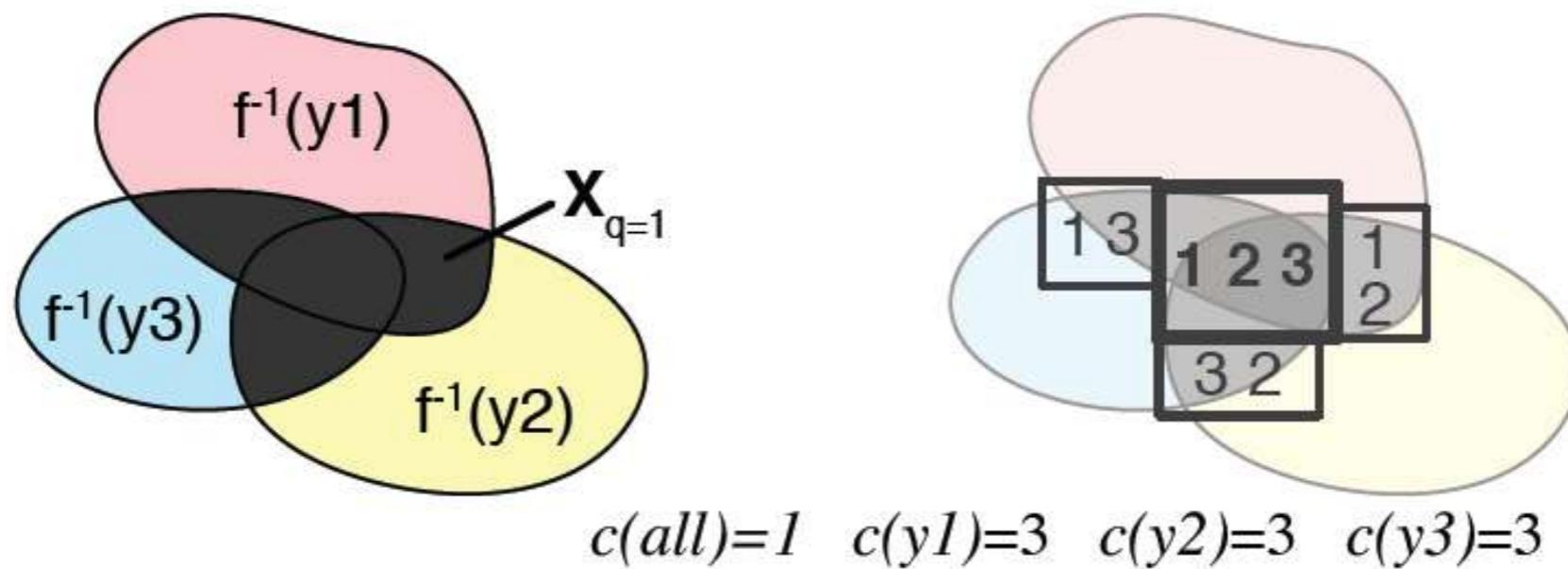
En GPS, le système fournit des variances de gaussiennes englobantes

# Détection et identification de défaut

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

## Pas de faute

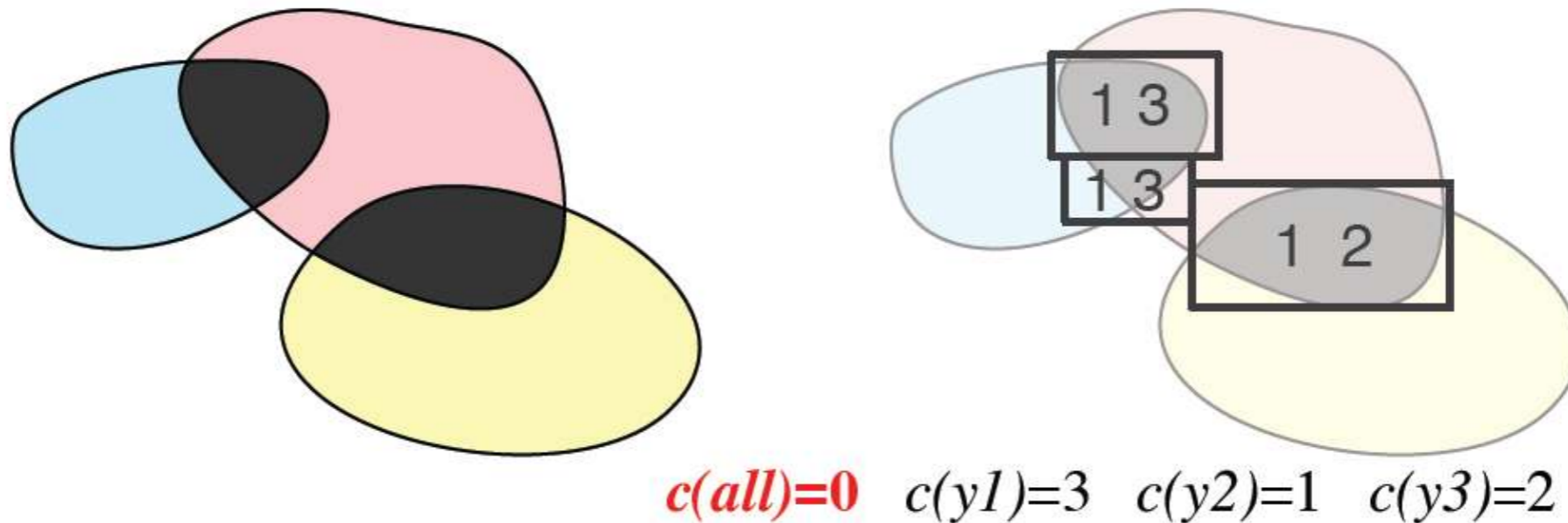
On ne détecte pas de faute si au moins une boîte de la solution est compatible avec toutes les mesures



# 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

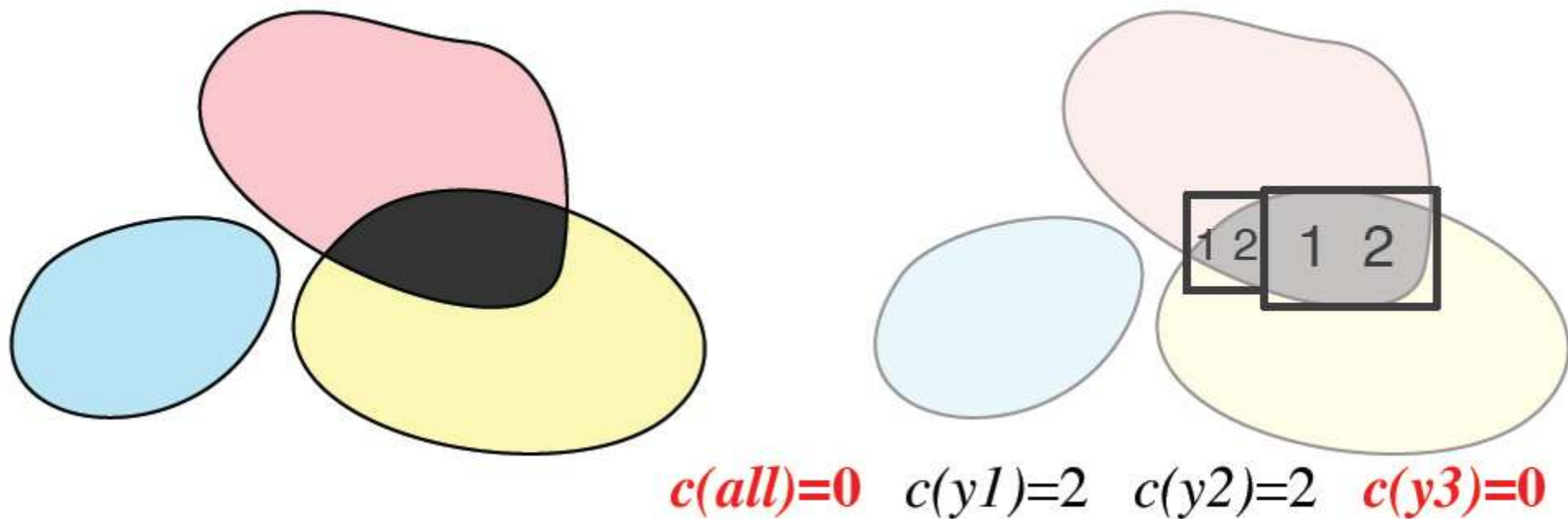


# Détection et identification de défaut

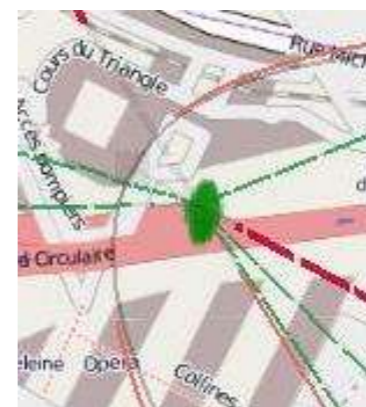
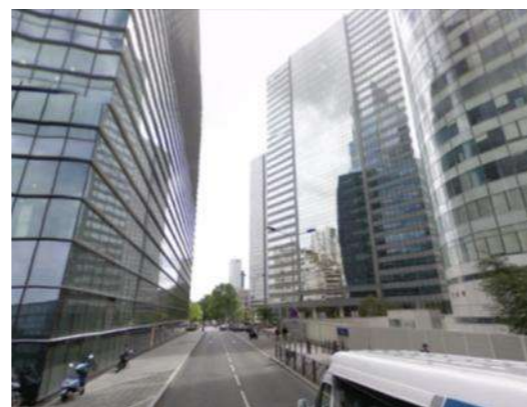
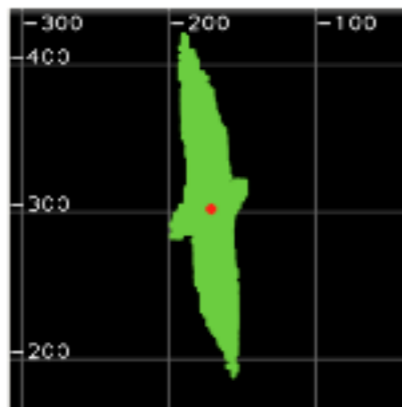
## Identification d'un défaut

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.

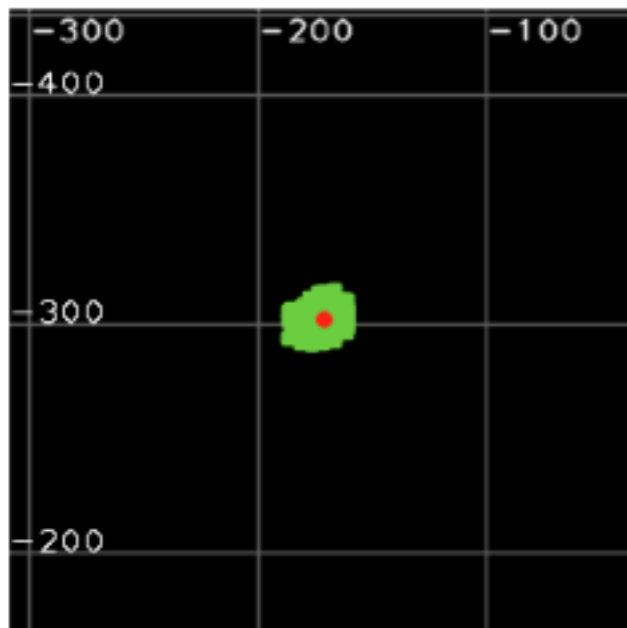


# Résultats

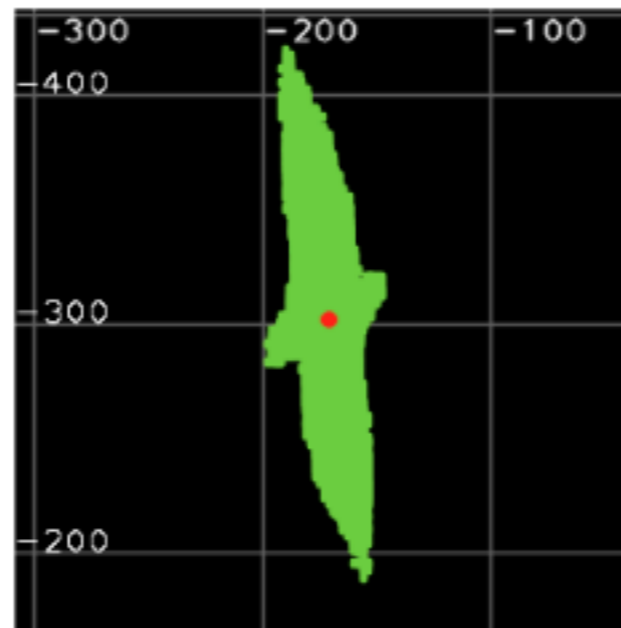




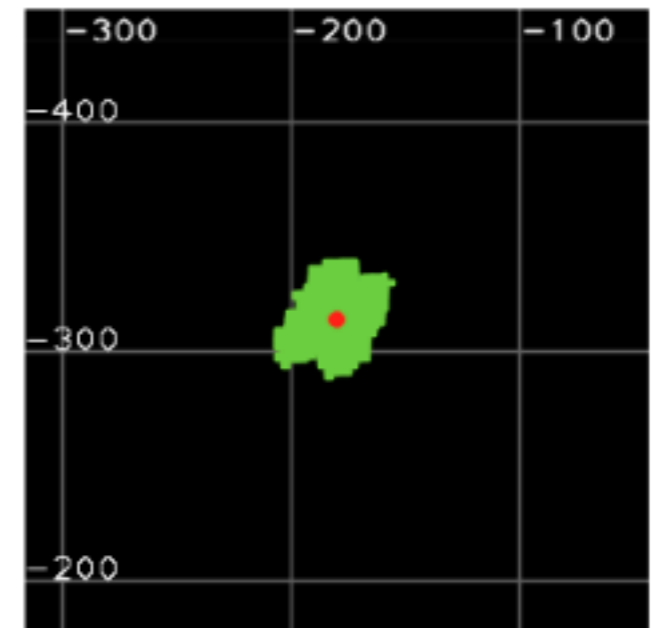
# Le MNT réduit l'incertitude de la localisation robuste



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

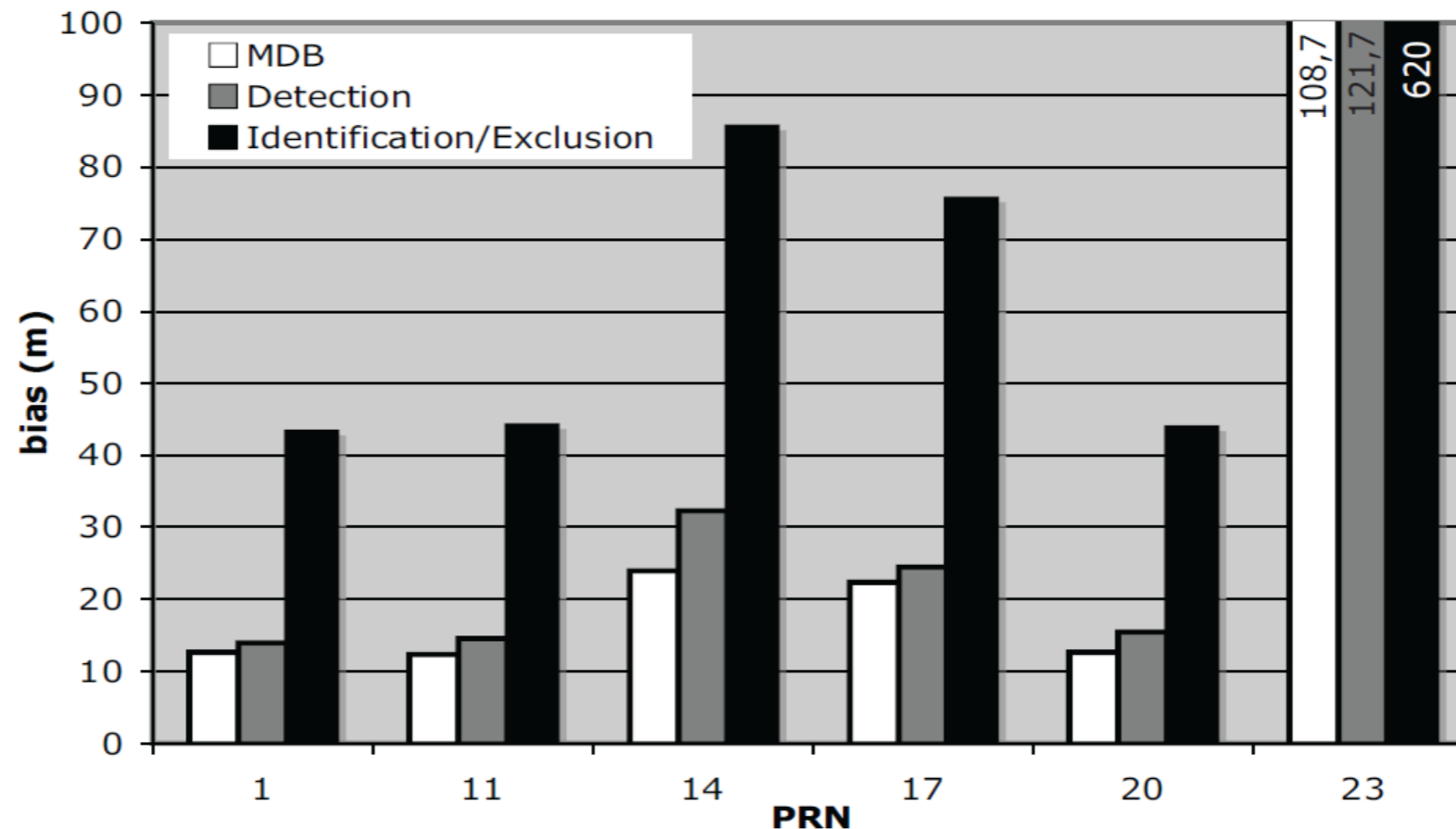
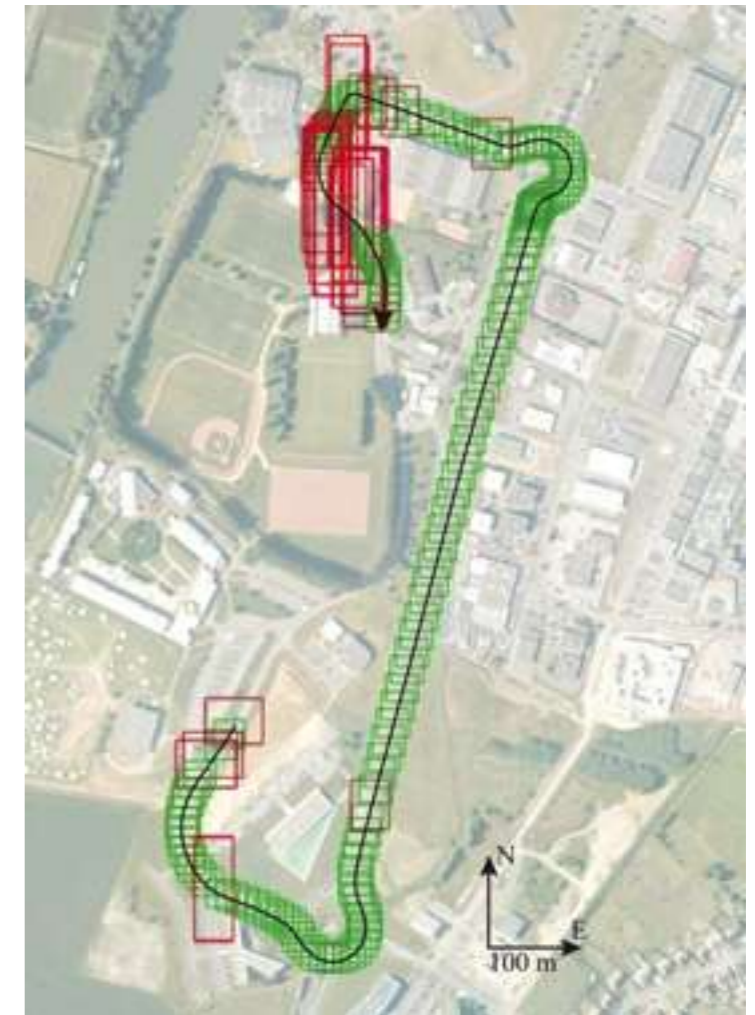


# Détection de défaut

## Comparaison avec l'approche standard

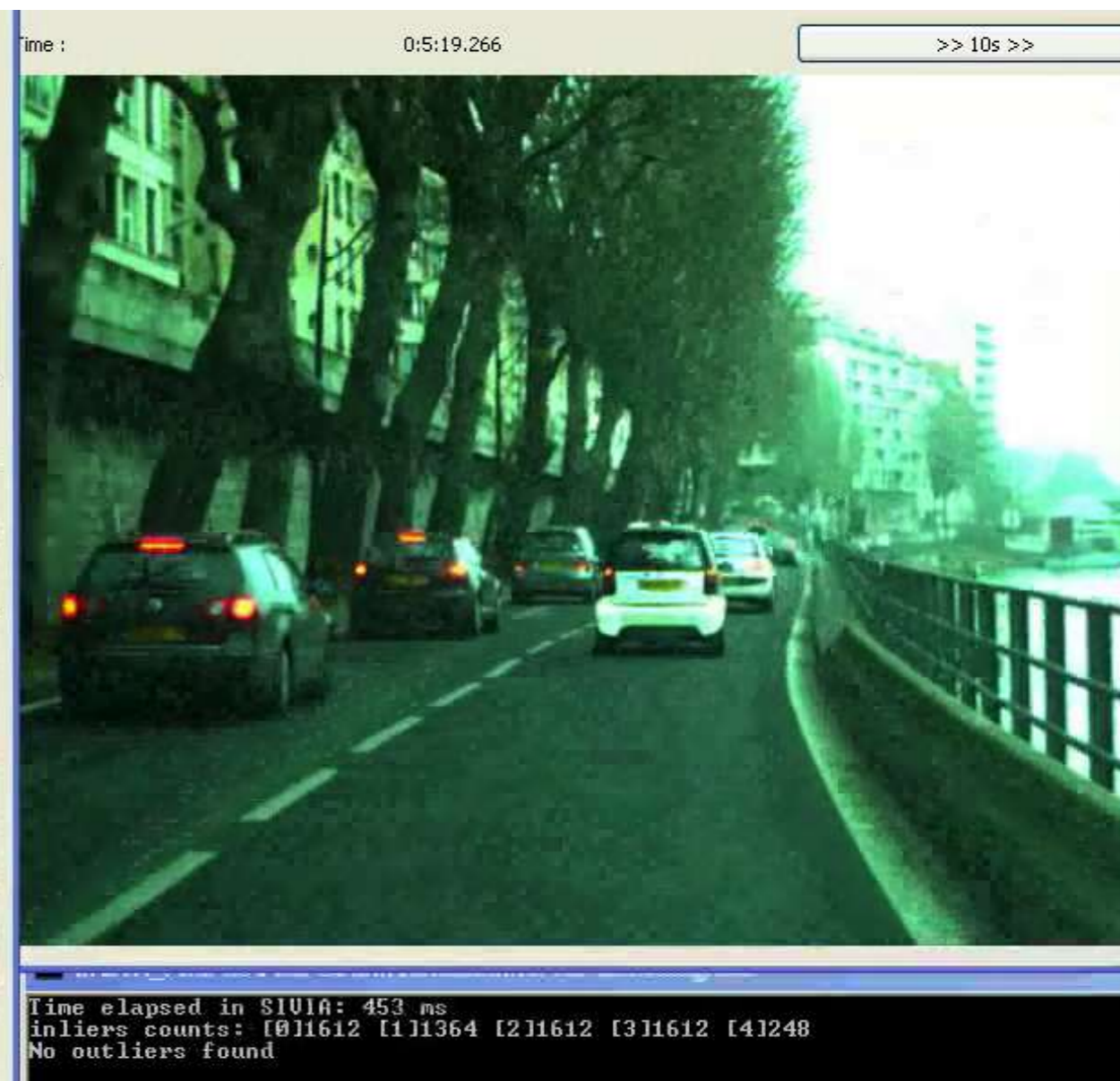
Données réelles avec injection d'un défaut sur un satellite.

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

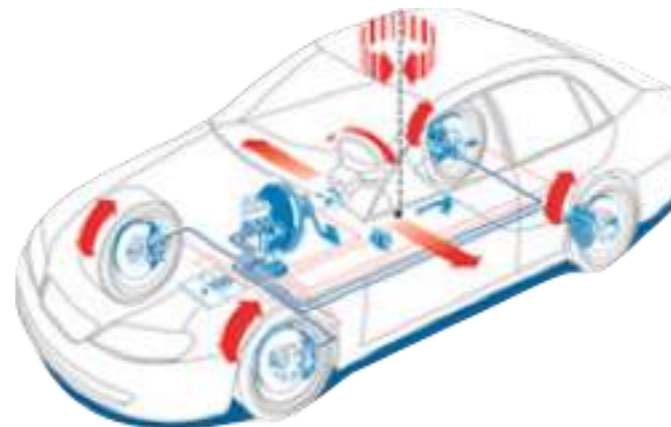
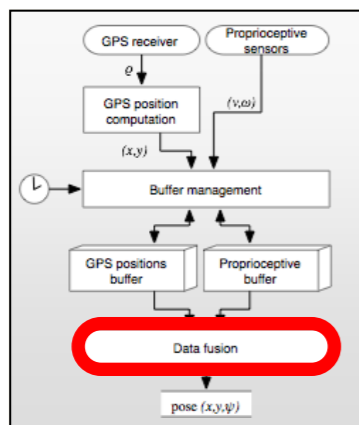




## Essai avec un récepteur bas coût *uBlox* à La Défense



# Localisation dynamique à partir d'un historique de données



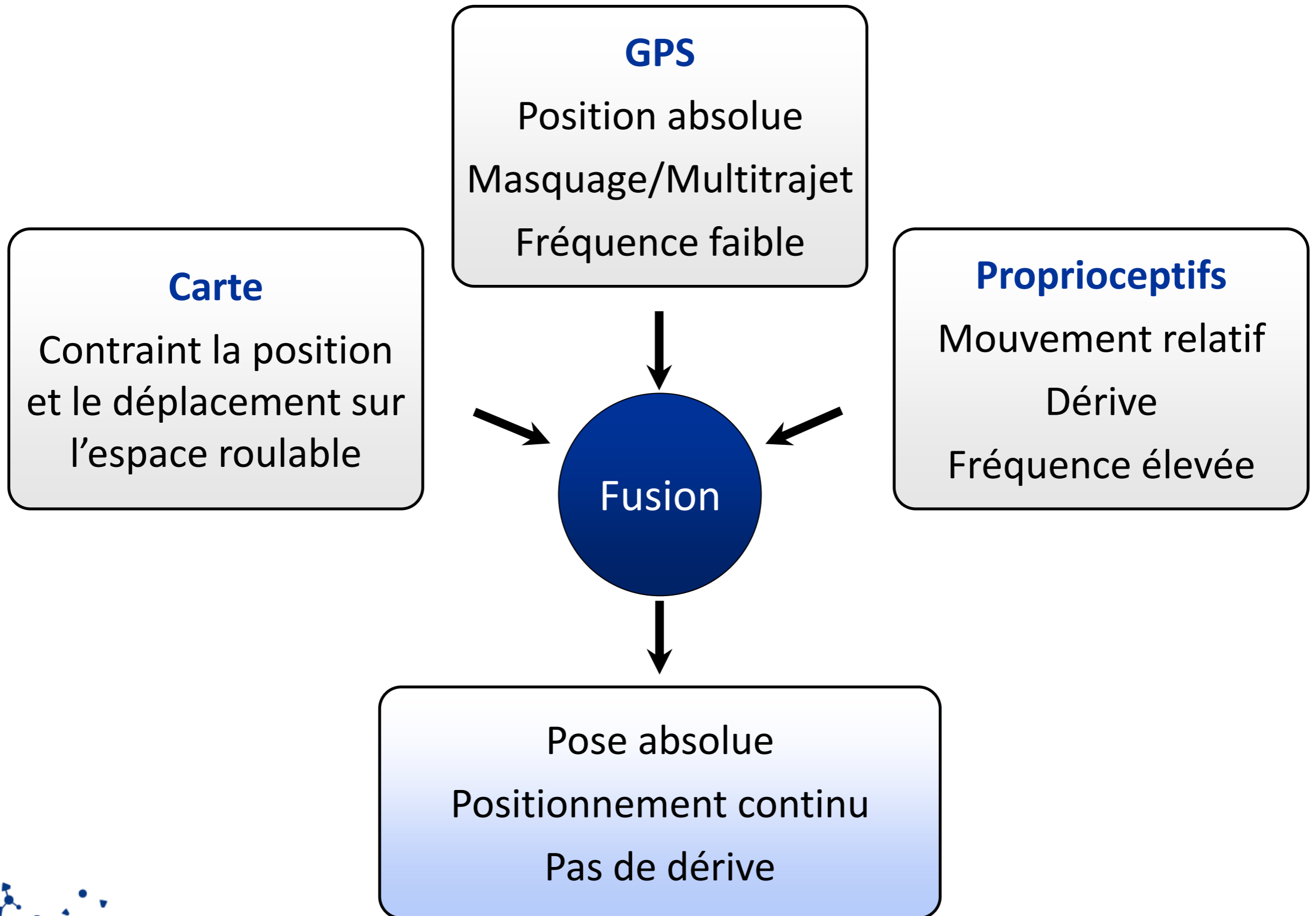
## Canyon urbain : masquage et multitrajets



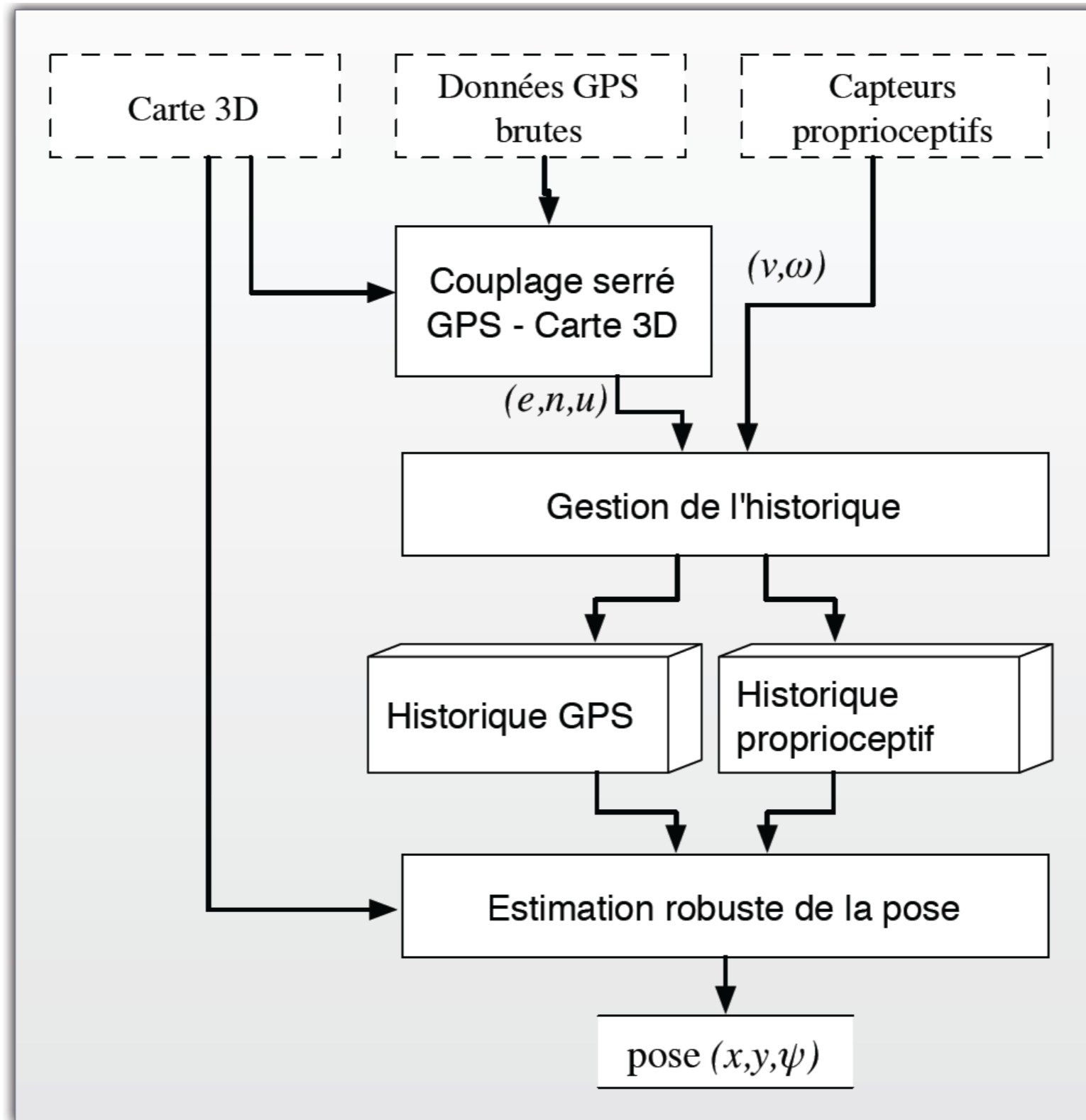


## Tunnel : pas de signal





# Localisation dynamique à partir d'un historique de données



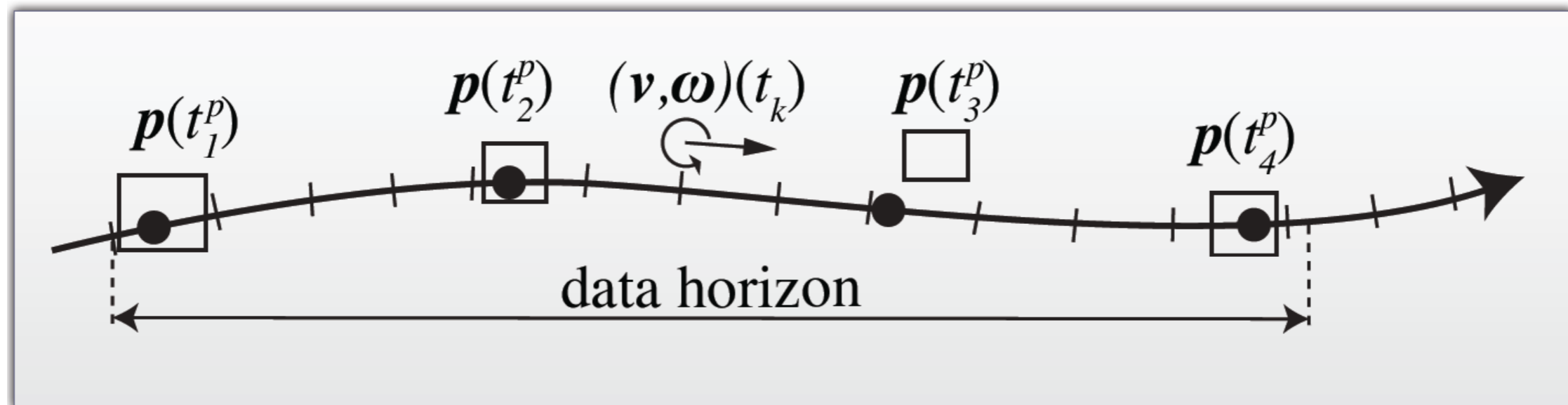
# Horizon de données

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



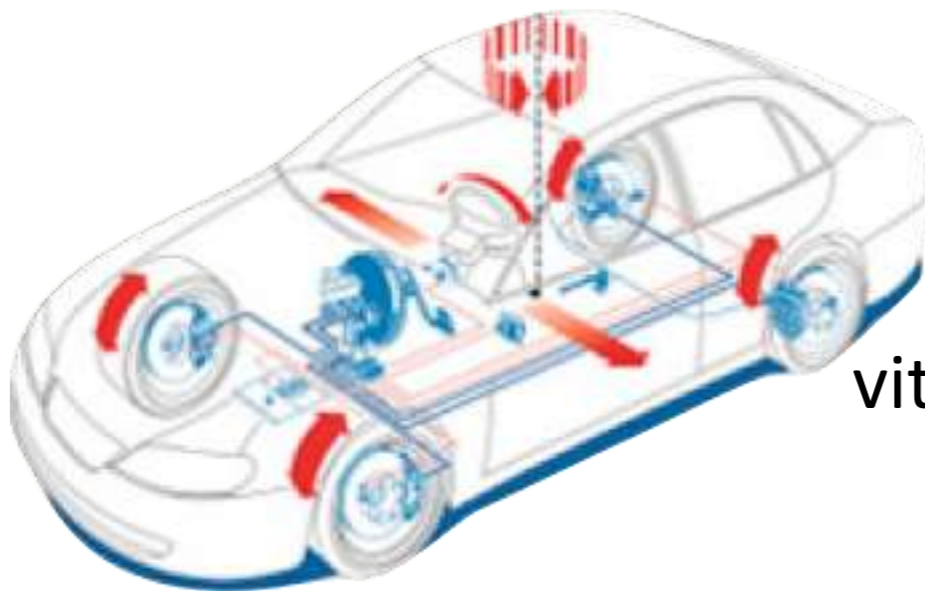
## Observateur de pose $(x,y,\psi)$

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

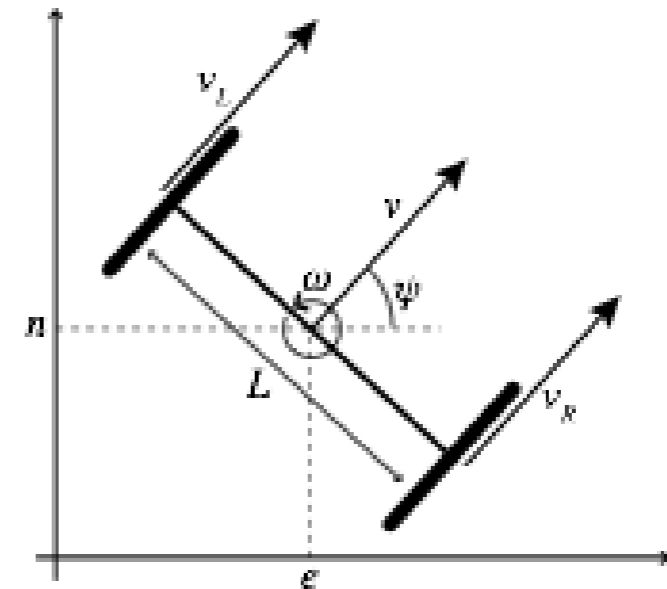
$$y(t_{k+1}) = y(t_k) + (t_{k+1}-t_k) \cdot v_{odo}(t) \cdot \sin \psi(t_k)$$

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

vitesse de lacet



vitesse des roues



# Prédiction de la dérive d'horloge avec peu de satellites

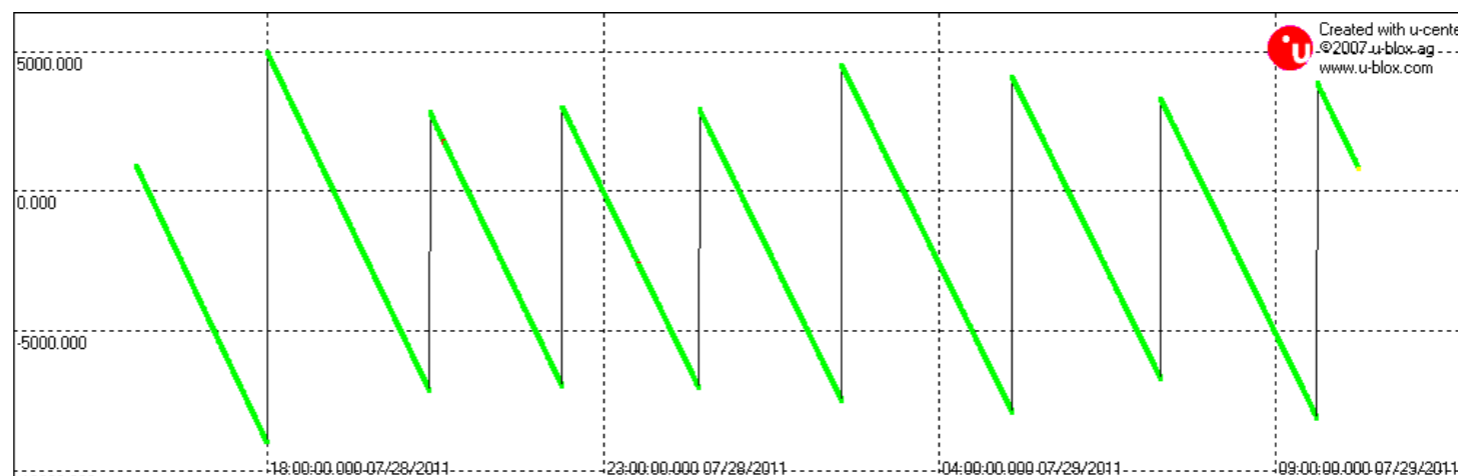
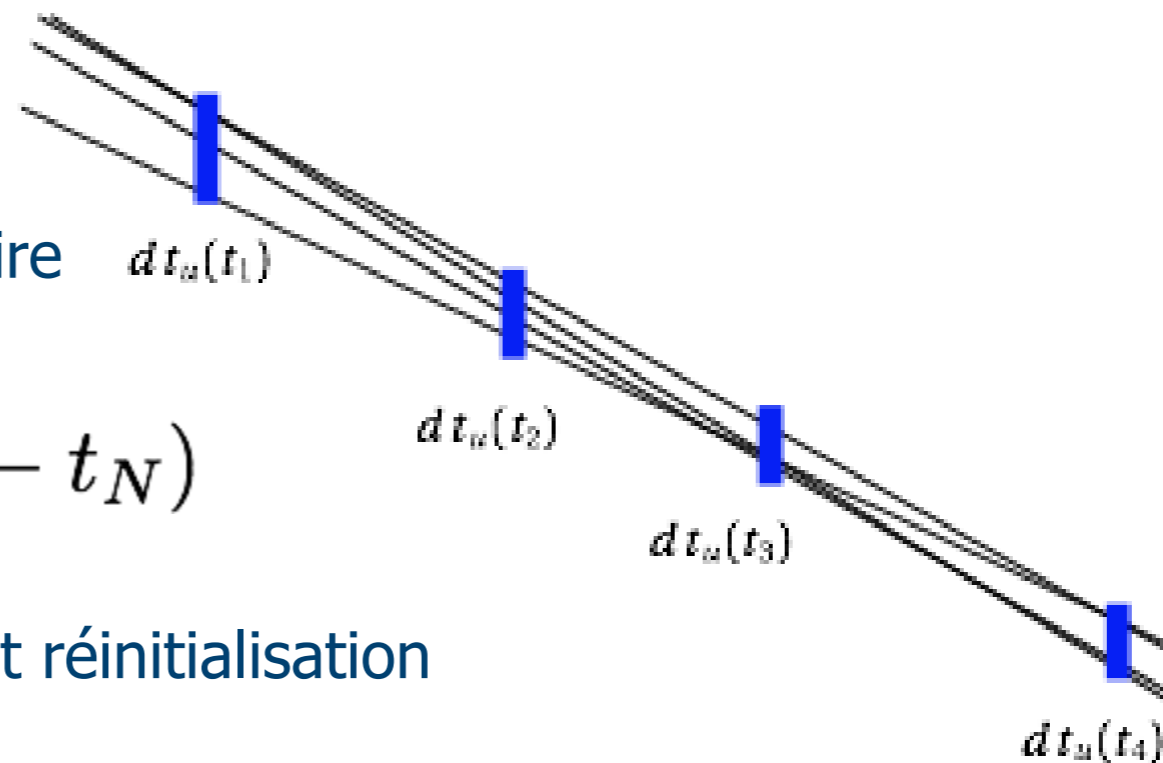
On mémorise le  $dt_u$  aux époques où il y a suffisamment de satellites

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

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

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

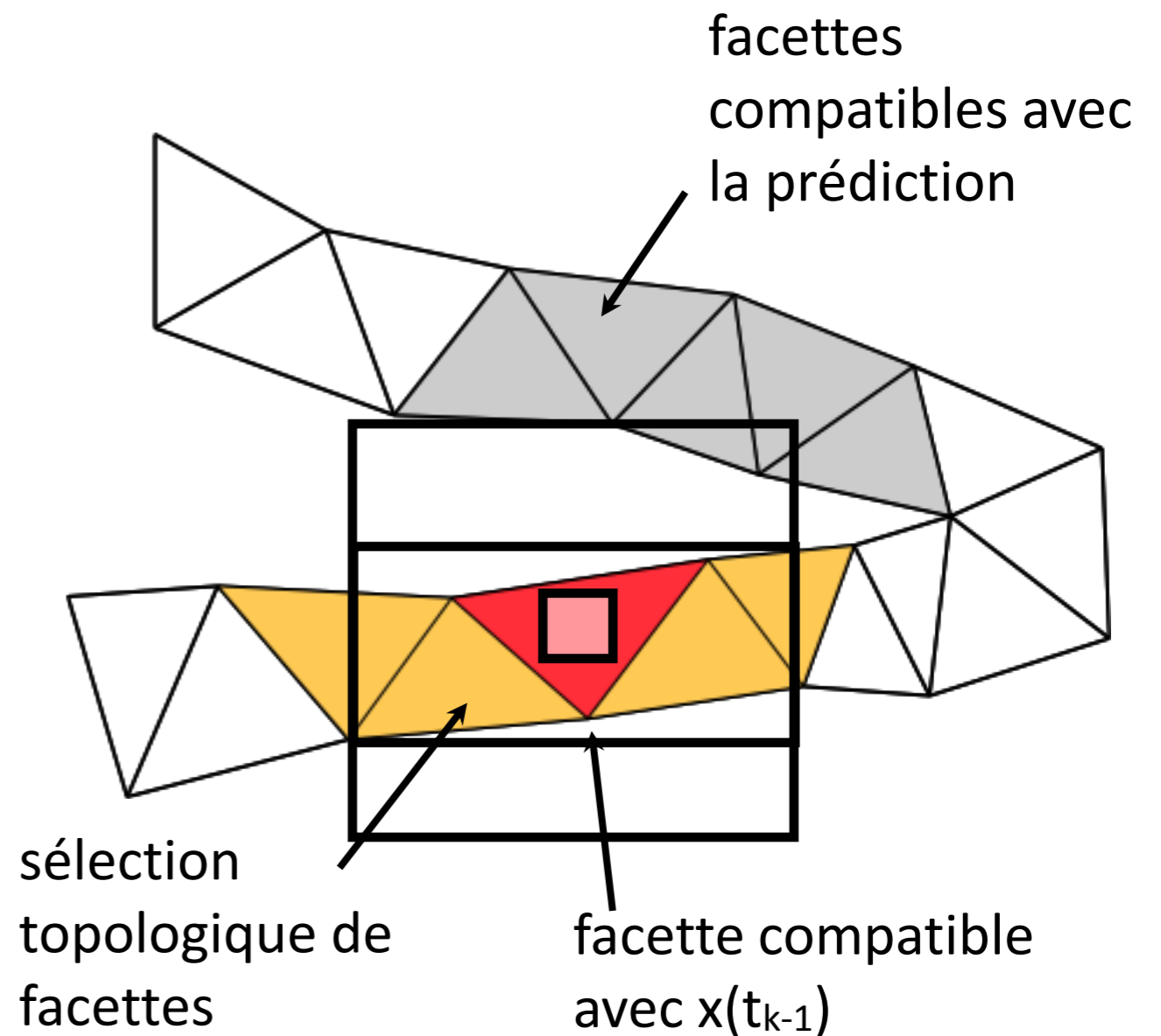
- Sauts d'horloge : détection et réinitialisation



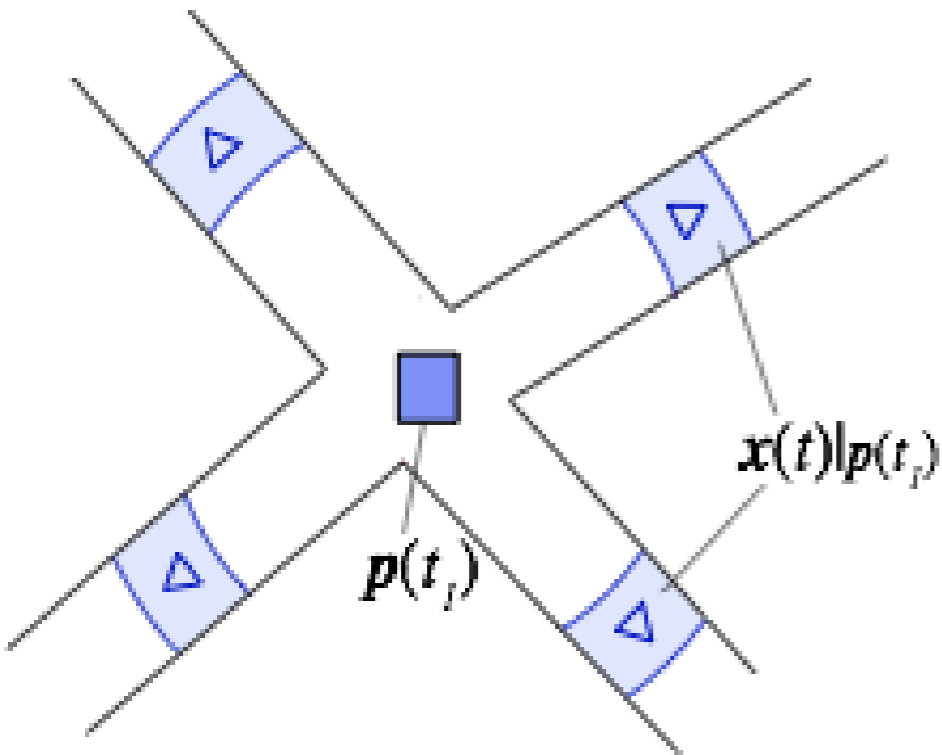
# Selection de facettes et contraction (map matching)

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

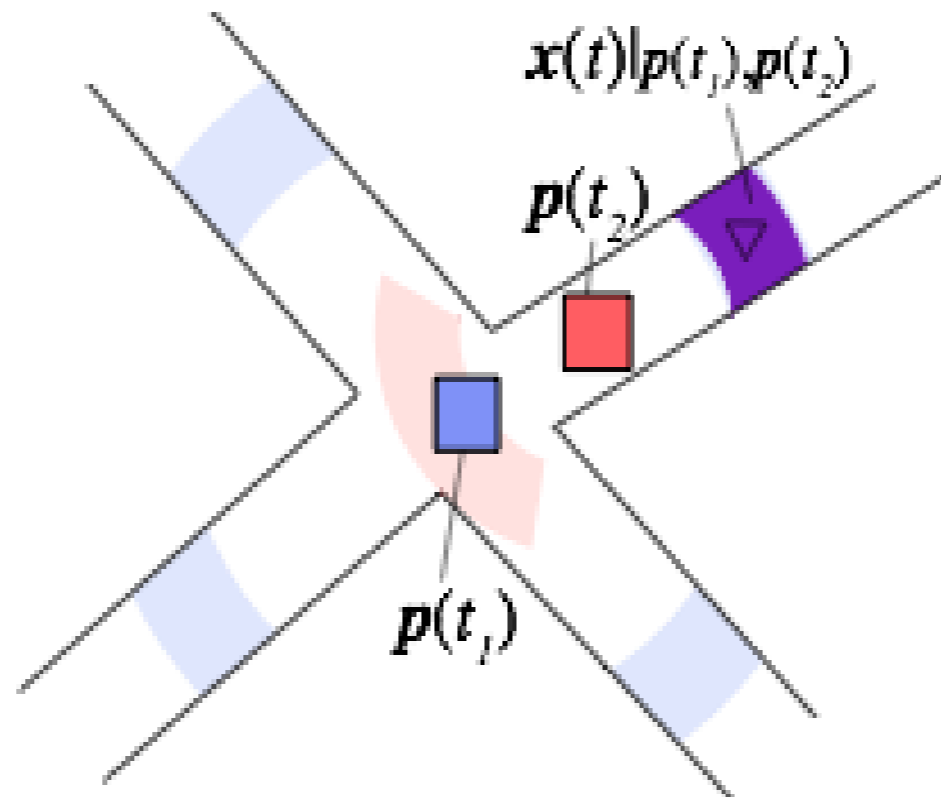
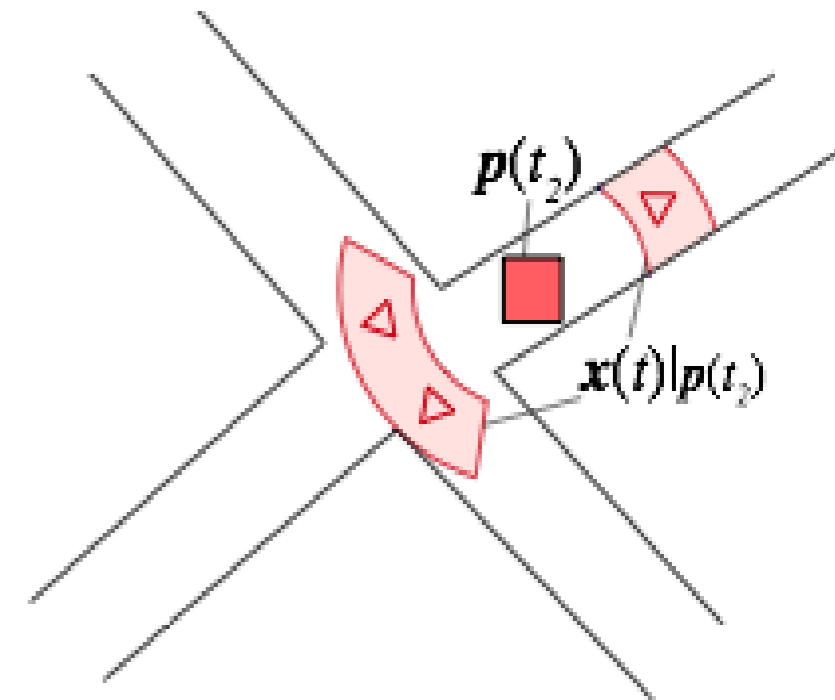
- Accélère le calcul
- Limite les solutions ambiguës dans les conditions GPS difficiles et les réseaux routiers denses



## Exemple avec deux positions dans l'historique



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





# Résultats

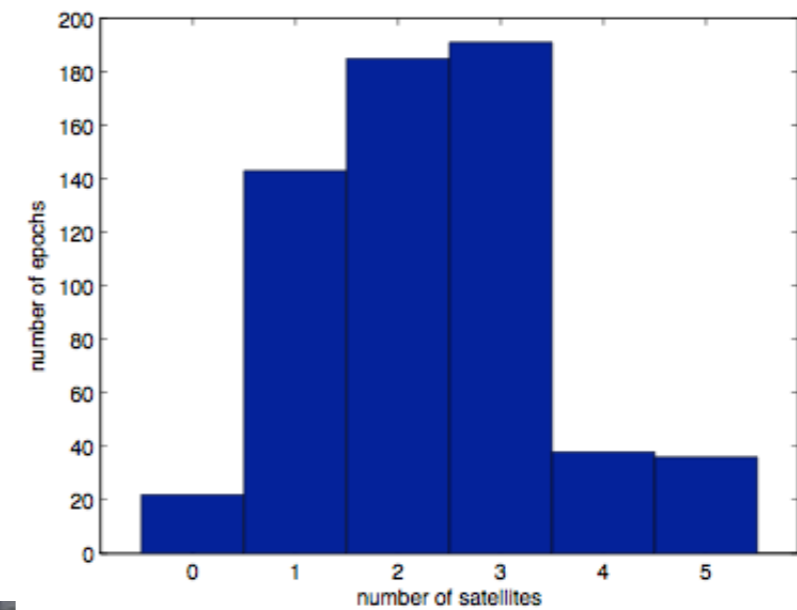


# Essai CityVIP : Mairie du XII<sup>e</sup> arrondissement de Paris

Boucle d'1 km

Mauvaise visibilité satellitaire

- 88%  $\leq 3$  satellites
- 56%  $\leq 2$  satellites





# Résultats : Mairie du XII<sup>e</sup> arrondissement de Paris

Horizon de 15 positions

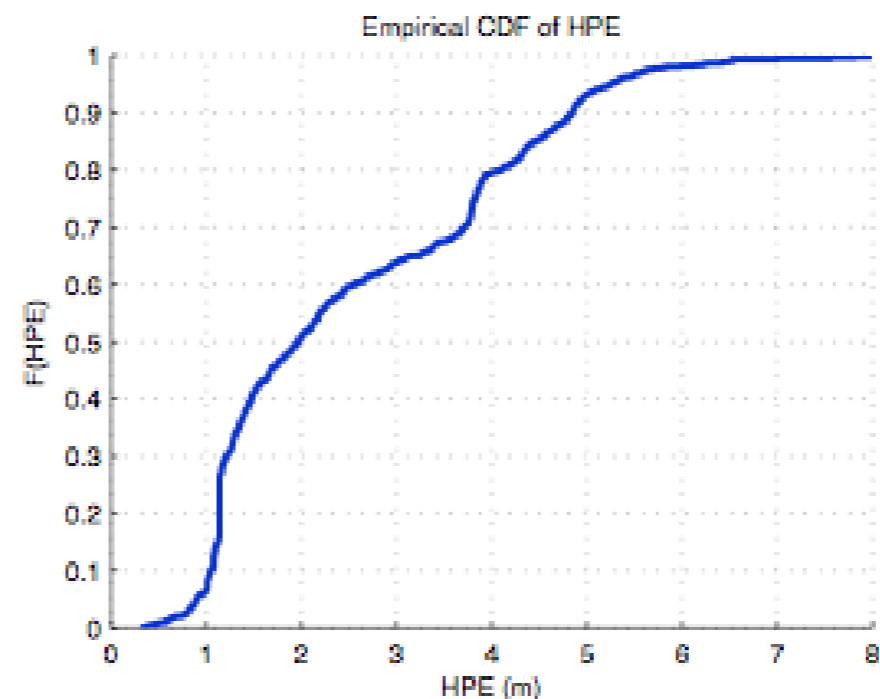
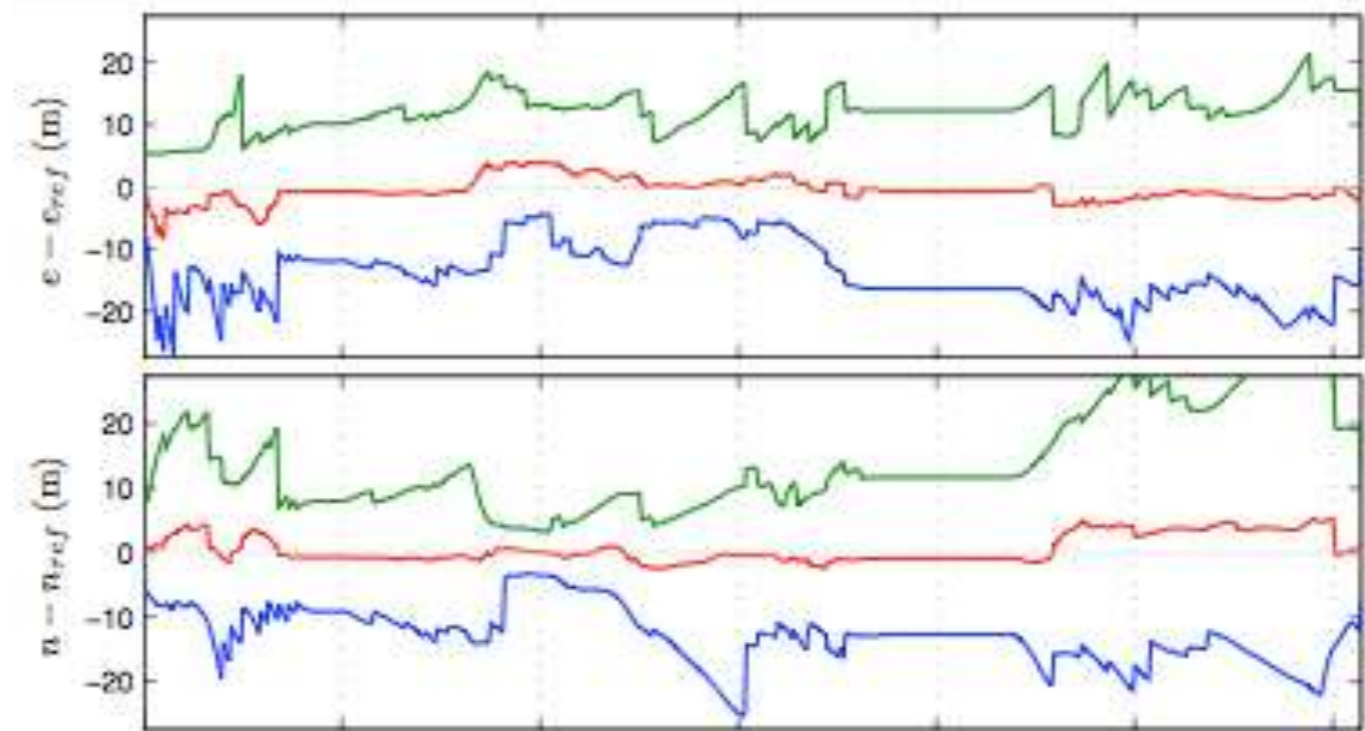
$q = 1$

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

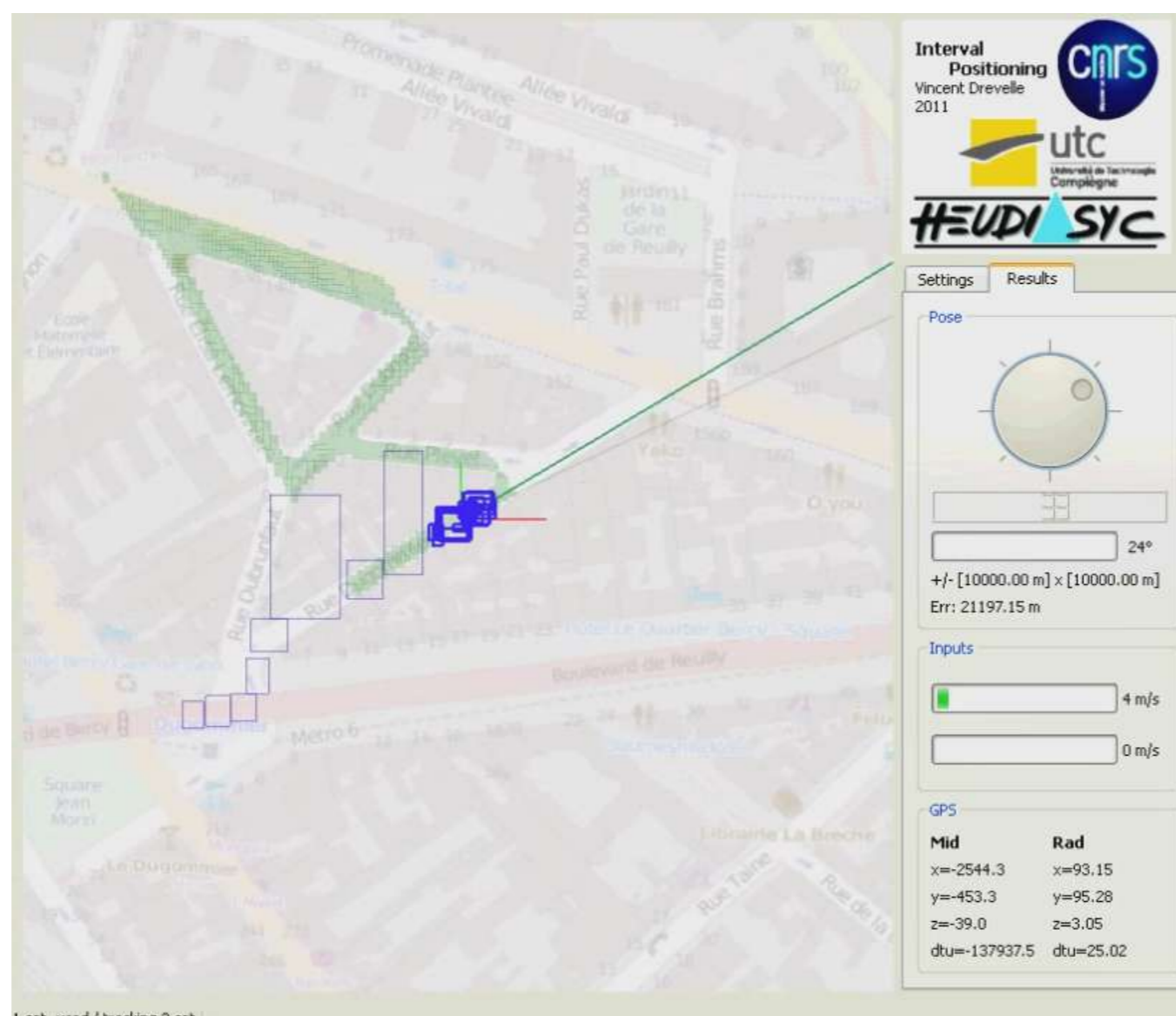
Les bornes sont consistantes avec la vérité terrain

Centre de gravité :

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



# Résultats : Mairie du XII<sup>e</sup> 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