



# Motifs spatio-temporels de trajectoires d'objets mobiles, de l'extraction à la détection de comportements inhabituels.

Application au trafic maritime.

Laurent ETIENNE

Institut de Recherche de l'École Navale  
Soutenance de thèse de doctorat en géomatique

08 décembre 2011



UBO  
université de bretagne  
occidentale

IRENAV

ueb

Composition du jury :

Rapporteurs :

Examineurs :

Directeur et Co-Directeur :

Pr. Hervé MARTIN, LIG Grenoble

Pr. Christophe CLARAMUNT, IRENAV Lanvéoc-Poulmic

Pr. Pascal PONCELET, LIRM Montpellier

Dr. Alain BOUJU, L3I La Rochelle

Pr. Karine ZEITOUNI, PRISM Versailles

Pr. Jacques TISSEAU, ENIB Brest

Pr. Thomas DEVOGELE, LIT Tours

- ▣ Introduction
- ▣ Modélisation des déplacements d'objets mobiles
- ▣ Similarité entre trajectoires
- ▣ Motifs de trajectoires
- ▣ Qualification spatio-temporelle
- ▣ Conclusion et perspectives

## ▣ Introduction

- ▣ Le contexte de la thèse
- ▣ Problématique et objectifs de recherche
- ▣ Modélisation des déplacements d'objets mobiles
- ▣ Similarité entre trajectoires
- ▣ Motifs de trajectoires
- ▣ Qualification spatio-temporelle
- ▣ Conclusion et perspectives

# L'étude du mouvement

- La compréhension des **déplacements** est une thématique de recherche active dans différents **domaines applicatifs**
  - Sociologie, écologie, transport, surveillance, renseignement...
- Les systèmes de **géolocalisation**
  - Permettent le suivi de différents **types d'objets mobiles**
  - Sont de plus en plus **répandus** (miniaturisation, coût, automatisation)
  - Génèrent des **volumes importants de données**
- Besoin d'**outils d'analyse** du mouvement
  - Sauvegarde de l'**historique** des positions
  - **Bases de données spatio-temporelles**
  - Outils simples d'**analyse spatiale et temporelle**
  - **Extraction de connaissances**



# Contexte maritime

## Le transport maritime

- 90% des échanges mondiaux
- 7 billions de tonnes par an

## Un espace ouvert

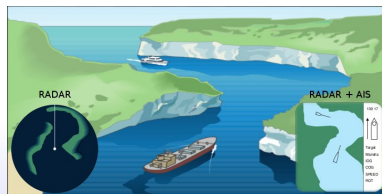
- Avec des règles
- Et des dangers

## Une surveillance constante

- **CROSS** : Centre Régional Opérationnel de Surveillance et de Sauvetage

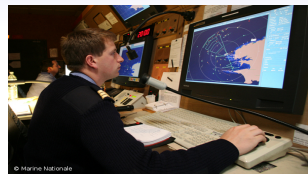
## Des outils de suivi des navires

- **AIS** : Automatic Identification System
- **RADAR** : RAdio Detection And Ranging
- **LRIT** : Long Range Identification and Tracking



# Surveillance du trafic

- ▣ **Bases de données opérationnelles**
  - Alimentées par **différentes sources** (récepteurs)
  - Ajout de **connaissances d'opérateurs**
- ▣ **Visualisation** de la situation en **temps réel**



# Surveillance du trafic

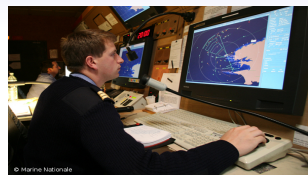
## ▣ Bases de données opérationnelles

- Alimentées par **différentes sources** (récepteurs)
- Ajout de **connaissances d'opérateurs**

## ▣ Visualisation de la situation en temps réel

## ▣ Missions de **surveillance du trafic** maritime

- Détection de **situations dangereuses** (collisions, respect des règles)
- Capacités d'analyse simple CPA (Closest Point of Approach)
- **Trafic maritime dense** (jusqu'à 250 navires à surveiller en même temps)
- **Surcharge cognitive** des opérateurs



© Marine Nationale

# Surveillance du trafic

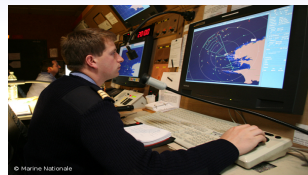
## ▣ Bases de données opérationnelles

- Alimentées par **différentes sources** (récepteurs)
- Ajout de **connaissances d'opérateurs**

## ▣ Visualisation de la situation en temps réel

## ▣ Missions de **surveillance du trafic** maritime

- Détection de **situations dangereuses** (collisions, respect des règles)
- Capacités d'analyse simple CPA (Closest Point of Approach)
- **Trafic maritime dense** (jusqu'à 250 navires à surveiller en même temps)
- **Surcharge cognitive** des opérateurs



## ▣ Besoin d'**outils d'analyse de comportement** plus perfectionnés



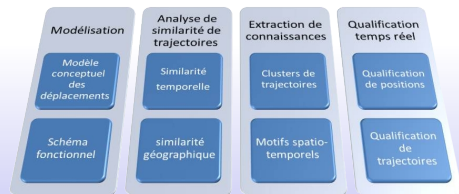
# Objectifs de recherche

- ➡ **Modélisation** du comportement d'objets mobiles
  - **Trajectoires** évoluant dans un **espace ouvert**
  - **Motifs spatio-temporels** de trajectoires
- ➡ Analyse de **similarité** de trajectoires
- ➡ **Extraction de connaissances** dans des bases de données de positions
- ➡ **Qualification** du comportement d'objets mobiles



## Cas applicatif

Détection de comportement inhabituel de navires dans un trafic maritime dense



# Verrous scientifiques

- ➡ Comment définir la notion de **similarité** entre des trajectoires afin de les comparer ?

# Verrous scientifiques

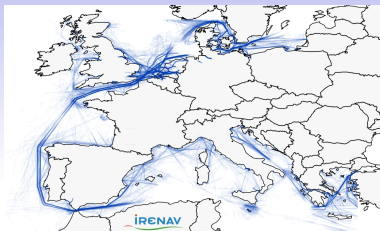
- ➡ Comment définir la notion de **similarité** entre des trajectoires afin de les comparer ?
- ➡ Comment sélectionner et **regrouper** des trajectoires similaires ?

# Verrous scientifiques

- ➡ Comment définir la notion de **similarité** entre des trajectoires afin de les comparer ?
- ➡ Comment sélectionner et **regrouper** des trajectoires similaires ?
- ➡ Comment **décrire le comportement** d'un groupe de trajectoires similaires sous la forme de **motifs** ?

# Verrous scientifiques

- ➡ Comment définir la notion de **similarité** entre des trajectoires afin de les comparer ?
- ➡ Comment sélectionner et **regrouper** des trajectoires similaires ?
- ➡ Comment **décrire le comportement** d'un groupe de trajectoires similaires sous la forme de **motifs** ?
- ➡ Comment **qualifier le comportement** d'un objet mobile à l'aide de ces motifs ?



Carte de densité des trajectoires de navires Europe (décembre 2010, 20 M de positions)



Carte de densité des trajectoires de "navires à passagers" Rade de Brest (De 2007 à 2010, 5234 trajectoires)

## 💡 Postulat

Des objets mobiles d'un **même type** évoluant dans un **même espace** ont des **comportements similaires** et suivent une **route optimisée** en fonction d'un ensemble d'**objectifs**.

# Vers un système d'aide à la décision

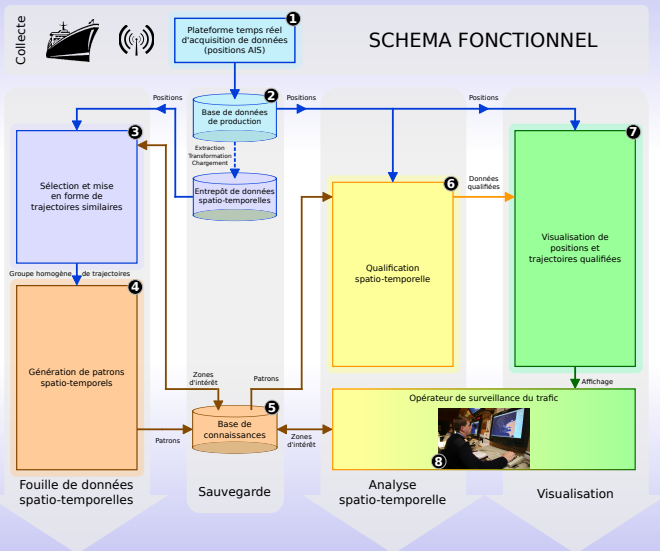


# Vers un système d'aide à la décision





# Méthodologie

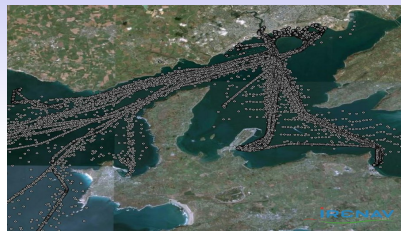


- ▣ Introduction
- ▣ Modélisation des déplacements d'objets mobiles
  - ▣ Les positions et trajectoires
  - ▣ Les itinéraires
  - ▣ Les groupes homogènes de trajectoires
- ▣ Similarité entre trajectoires
- ▣ Motifs de trajectoires
- ▣ Qualification spatio-temporelle
- ▣ Conclusion et perspectives

# Trajectoire d'un objet mobile

➡ Une **position** est composée de

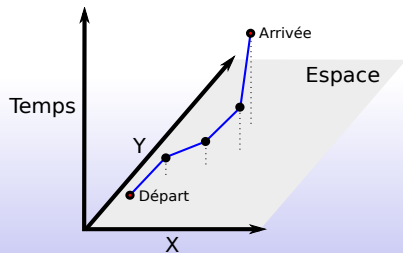
- **Point**
- **Estampille temporelle**
- Cap
- Vitesse
- Accélération
- Vitesse de rotation



Extrait des 4 821 447 positions AIS de navires ayant transités dans la rade de Brest entre 2007 et 2010

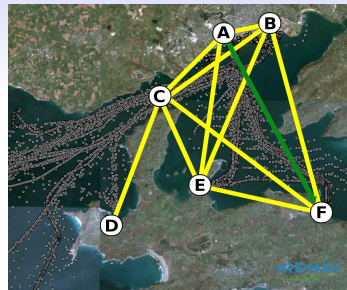
➡ Une **trajectoire** est une **séquence de positions** entre deux **stops** ou **zones** d'intérêt [Hä70, HE02, SPD<sup>+</sup>08]

- Même **objet mobile** (id, type...)
- Ordonnée temporellement
- Position de **départ**
- Position d'**arrivée**



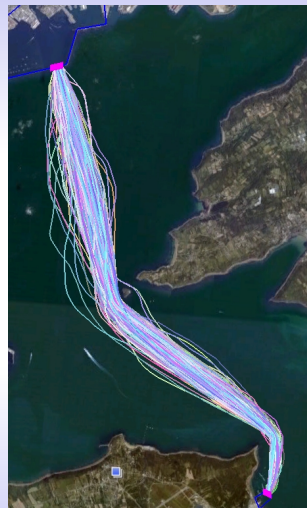
# L'itinéraire

- **Lien** entre des zones d'intérêt
  - **Graphe de zones**
- Une trajectoire **suit un itinéraire** si :
  - Sa position de **départ** est située dans la première zone de l'itinéraire
  - Sa position d'**arrivée** est située dans la dernière zone de l'itinéraire
  - La trajectoire n'intersecte **aucune autre zone** du graphe.
- Exemple applicatif :
  - Le **transrade** entre "Brest et Lanvéoc" ( $A \rightarrow F$ )



# Groupe homogène de trajectoires (*GHT*)

- ⇒ **Regroupement** (*clustering*)  
de trajectoires **similaires**  
suivant un **même itinéraire**



*GHT* de 500 trajectoires de "navires à passagers"  
suivant l'itinéraire "Brest → Lanvéoc"

- ▣ Introduction
- ▣ Modélisation des déplacements d'objets mobiles
- ▣ Similarité entre trajectoires
  - ▣ Analyse de séries temporelles
  - ▣ Analyse de la géométrie
  - ▣ Application aux trajectoires
- ▣ Motifs de trajectoires
- ▣ Qualification spatio-temporelle
- ▣ Conclusion et perspectives

# Similarité de séries temporelles

## ▣ Comparaison de séries de données

- **Distance de Minkowski** ( $Lp_{norm}$ ) [AIS93, FJMM97]
- **Distance d'édition** ( $ED$ ) [Lev66, COO05]
- **Plus longue sous-séquence commune** ( $LCSS$ ) [ALSS95, VHKG03]
- **Déformation temporelle dynamique** ( $DTW$ ) [SC78, KR05]

# Similarité basée sur la géométrie

## ▣ Comparaison de la géométrie de polygones

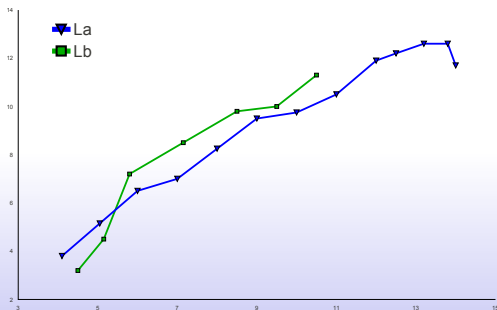
- Distance moyenne [McM86]
- Distance de Hausdorff [Hau18, Alt09]
- **Distance de Fréchet** [Fr5, AHPK<sup>+</sup>06]
- Distance de Fréchet discrète semi-partielle [Dev02]



# Similarité basée sur la géométrie

## ➡ Comparaison de la géométrie de polygones

- Distance moyenne [McM86]
- Distance de Hausdorff [Hau18, Alt09]
- Distance de Fréchet [Fr5, AHPK<sup>+</sup>06]
- **Distance de Fréchet discrète semi-partielle** [Dev02]



# Similarité basée sur la géométrie

## Comparaison de la géométrie de polygones

- Distance moyenne [McM86]
- Distance de Hausdorff [Hau18, Alt09]
- Distance de Fréchet [Fr5, AHPK<sup>+</sup>06]
- **Distance de Fréchet discrète semi-partielle** [Dev02]

Ligne a		N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Xa			4,1	5,05	6	7	8	9	10	11	12	12,5	13,2	13,8	14
Ya			3,8	5,15	6,5	7	8,25	9,5	9,75	10,5	11,9	12,2	12,6	12,6	11,7

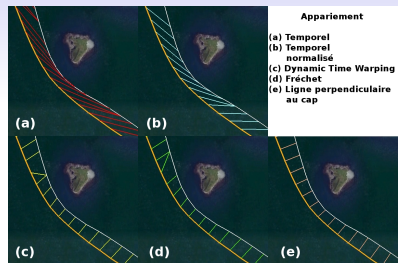
Ligne b		Matrice de distances														
N°	Xb	Yb	MD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	4,5	3,2	1	0,72	2,03	3,62	4,55	6,14	7,74	8,55	9,77	11,49	12,04	12,81	13,22	12,75
2	5,2	4,5	2	1,26	0,66	2,17	3,11	4,71	6,31	7,15	8,38	10,08	10,64	11,42	11,85	11,41
3	5,8	7,2	3	3,80	2,18	0,73	1,22	2,44	3,94	4,91	6,16	7,78	8,36	9,16	9,65	9,35
4	7,2	8,5	4	5,60	3,95	2,31	1,51	0,89	2,10	3,11	4,34	5,92	6,50	7,31	7,81	7,56
5	8,5	9,8	5	7,44	5,79	4,14	3,18	1,63	0,58	1,50	2,60	4,08	4,66	5,47	5,99	5,82
6	9,5	10	6	8,22	6,58	4,95	3,91	2,30	0,71	0,56	1,58	3,14	3,72	4,52	5,02	4,81
7	11	11	7	9,86	8,22	6,58	5,54	3,94	2,34	1,63	0,94	1,62	2,19	3,00	3,55	3,52

Ligne b		Matrice de Fréchet														
N°	Xb	Yb	MF	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	4,5	3,2	1	0,72	2,03	3,62	4,55	6,14	7,74	8,55	9,77	11,49	12,04	12,81	13,22	13,22
2	5,2	4,5	2	1,26	0,72	2,17	3,11	4,71	6,31	7,15	8,38	10,08	10,64	11,42	11,85	11,85
3	5,8	7,2	3	3,80	2,18	0,73	1,22	2,44	3,94	4,91	6,16	7,78	8,36	9,16	9,65	9,65
4	7,2	8,5	4	5,60	3,95	2,31	1,51	1,22	2,10	3,11	4,34	5,92	6,50	7,31	7,81	7,81
5	8,5	9,8	5	7,44	5,79	4,14	3,18	1,63	1,22	1,50	2,60	4,08	4,66	5,47	5,99	5,99
6	9,5	10	6	8,22	6,58	4,95	3,91	2,30	1,22	1,22	1,58	3,14	3,72	4,52	5,02	5,02
7	11	11	7	9,86	8,22	6,58	5,54	3,94	2,34	1,63	1,22	1,62	2,19	3,00	3,55	3,55

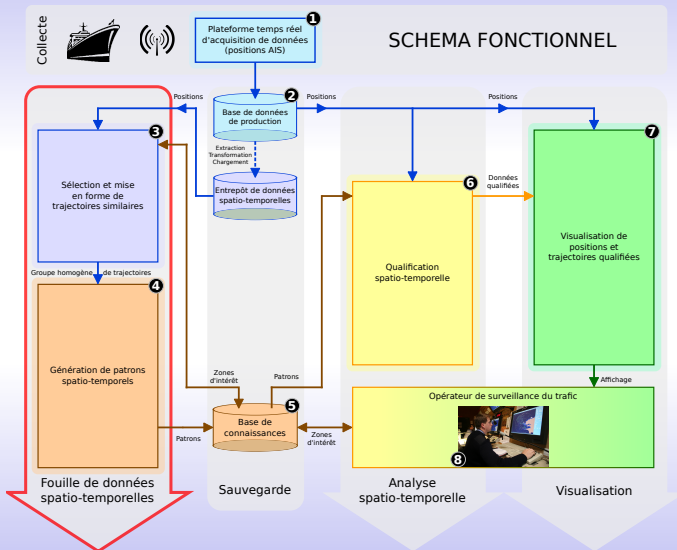
# Analyse comparative des techniques d'appariement de trajectoires

- Aux mêmes **temps relatifs**
  - ◆ Problème en cas de vitesses différentes
- Aux mêmes **temps relatifs normalisés**
  - ◆ Problème d'appariement partiel (trajectoire non terminée)
- Au **plus proche** spatialement
  - ◆ Problème de respect de l'ordonnancement temporel en cas de boucle dans la trajectoire
- **Dynamic Time Warping**
  - ◆ Problème en cas d'échantillonnage différent et d'appariement partiel
- **Fréchet**
  - ◆ Problème en cas d'échantillonnage différent, appariement partiel possible
- **Ligne perpendiculaire au cap**
  - ◆ Problème d'interpolation, de respect de l'ordonnancement temporel, non symétrique



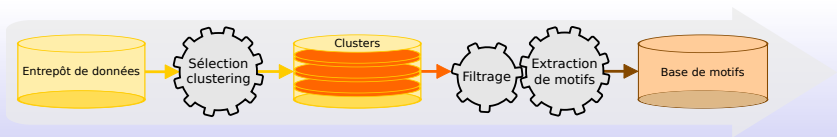
- ▣ Introduction
- ▣ Modélisation des déplacements d'objets mobiles
- ▣ Similarité entre trajectoires
- ▣ **Motifs de trajectoires**
  - ▣ Sélection et mise en forme de trajectoires similaires
  - ▣ Patron spatio-temporel de trajectoires
- ▣ Qualification spatio-temporelle
- ▣ Conclusion et perspectives

# Méthodologie

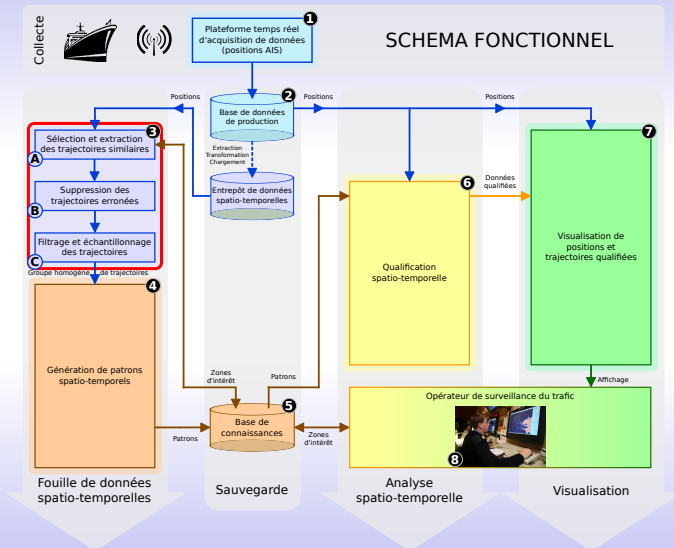


# Fouille de données spatio-temporelles

- **Extraction de connaissances** dans un **entrepôt de données** spatio-temporelles
  - **Sélectionner** des groupes homogènes de trajectoires (*GHT*)
- **Synthétiser** dans un **motif spatio-temporel** le **comportement** du *GHT* : la **route type**
  - Définir la **trajectoire type**
  - Déterminer l'**extension spatiale** par rapport à la trajectoire type (couloir spatial)
  - ainsi que la **dilatation temporelle** (couloir temporel).

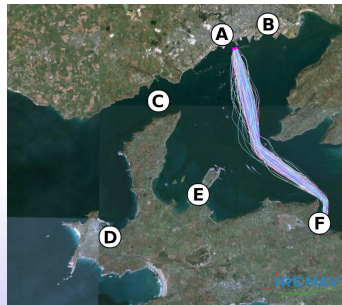
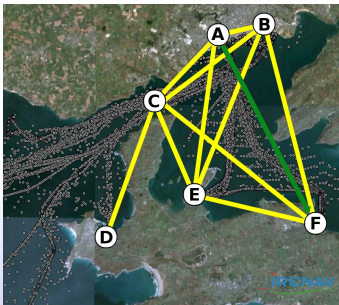


# Méthodologie



## Sélection et mise en forme des données

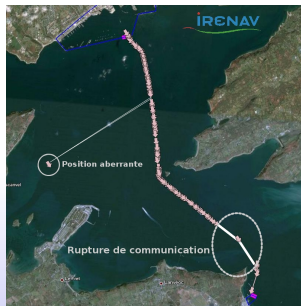
- ➔ **Sélection** et **extraction** de trajectoires similaires  
(même itinéraire du graphe de zones)





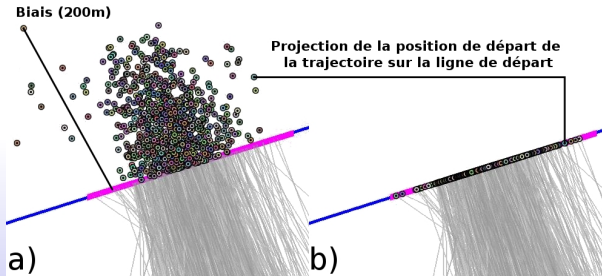
# Sélection et mise en forme des données

- ➡ Sélection et extraction de trajectoires similaires
- ➡ **Suppression** des trajectoires erronées



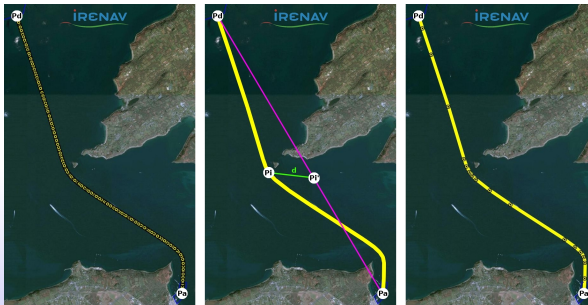
# Sélection et mise en forme des données

- ➡ Sélection et extraction de trajectoires similaires
- ➡ Suppression des trajectoires erronées
- ➡ **Filtrage** et **rééchantillonnage** des trajectoires



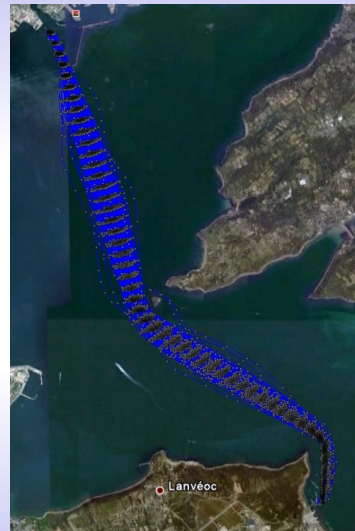
# Sélection et mise en forme des données

- ➡ Sélection et extraction de trajectoires similaires
- ➡ Suppression des trajectoires erronées
- ➡ **Filtrage** et **rééchantillonnage** des trajectoires

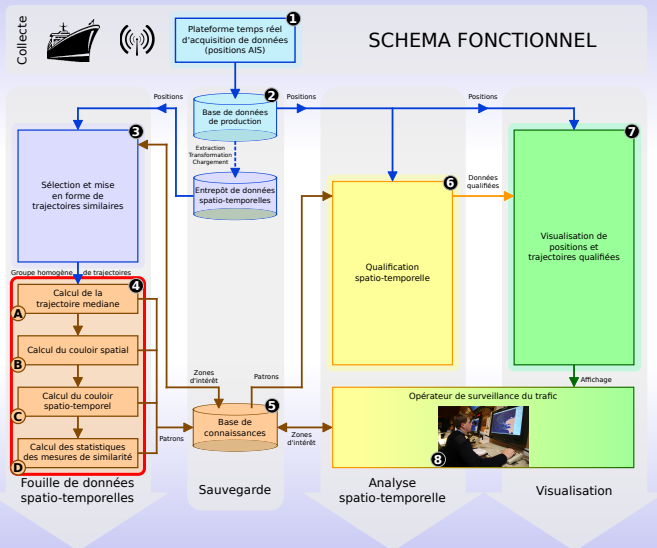


# Sélection et mise en forme des données

- ➡ Sélection et extraction de trajectoires similaires
- ➡ Suppression des trajectoires erronées
- ➡ Filtrage et rééchantillonnage des trajectoires
- ➡ **Groupe homogène de trajectoires (GHT)**  
d'un même **itinéraire**  
à un **échantillonnage régulier**

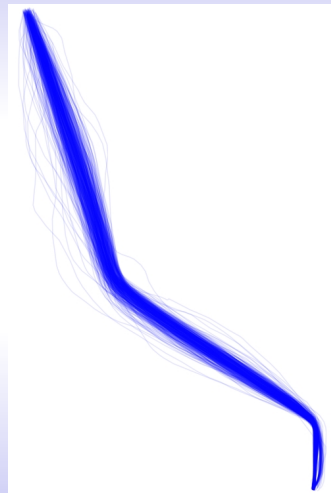


# Méthodologie



# Représentation synthétique d'un *GHT*

- ▣ Comment **synthétiser le comportement** d'un *GHT* ? Les trajectoires d'un *GHT* suivent-elles une **même route** ?
  - Y a-t-il une différence de **densité** ? (**étalement, symétrie**)



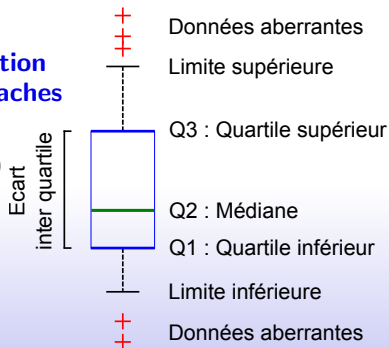
# Représentation synthétique d'un *GHT*

- Comment **synthétiser le comportement** d'un *GHT* ? Les trajectoires du *GHT* suivent-elles une **même route** ?

- Y a-t-il une différence de **densité** ? (étalement, symétrie)

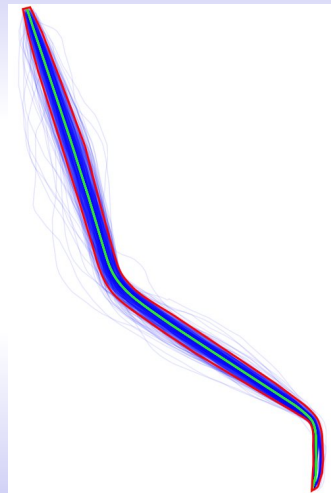
- Représentation **synthétique** d'une **distribution statistique** sous forme de **boîtes à moustaches**

- Médiane** (symétrie)
- Premier et troisième **quartile** (étalement)
- Limites** inférieure et supérieure (présence de **données aberrantes**)



# Représentation synthétique d'un *GHT*

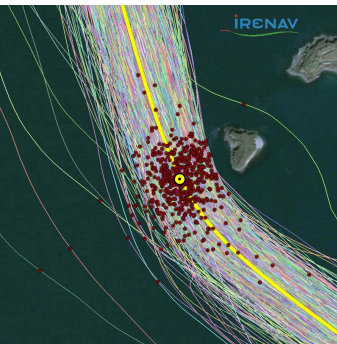
- Comment **synthétiser le comportement** d'un *GHT* ? Les trajectoires du *GHT* suivent-elles une **même route** ?
  - Y a-t-il une différence de **densité** ? (**étalement, symétrie**)
- Représentation **synthétique** d'une **distribution statistique** sous forme de **boîtes à moustaches**
  - **Médiane** (symétrie)
  - Premier et troisième **quartile** (étalement)
  - **Limites** inférieure et supérieure (présence de **données aberrantes**)
- **Extension spatio-temporelle** (2D+t) du concept de **boîtes à moustaches**
  - la **route type**



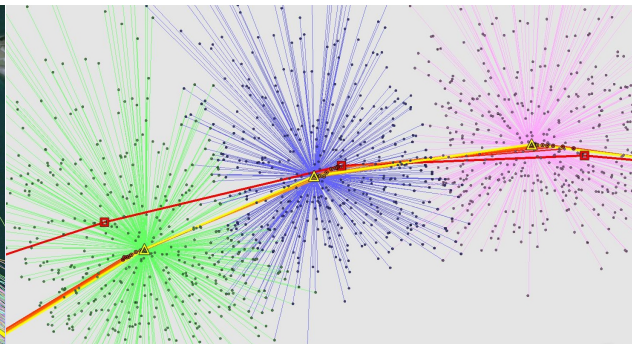


# Trajectoire type

- ➔ **Calcul d'une trajectoire médiane** suivie par les trajectoires du *GHT*
  - Regrouper les **nuages de positions homologues** des trajectoires du *GHT*
    - ◆ au même **temps normalisé**
    - ◆ par appariement de **Fréchet**
  - Calculer la **position médiane agrégée** des nuages



Nuage de positions au même temps normalisé



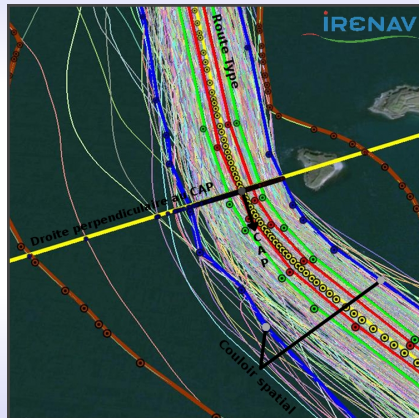
Nuages de positions appariés à une même position de référence (Fréchet)

## Couloir spatio-temporel

- ➡ Calcul d'un **couloir spatio-temporel** autour de la **trajectoire type** contenant la majorité des trajectoires du *GHT*

Interpoler le *GHT* sur la **droite perpendiculaire au cap** des positions médianes ( $\tilde{p}$ )

- Calculer les **distances spatiales** par rapport à  $\tilde{p}$ 
  - ◆ Trier par distance ( $\Delta_{\text{gauche}}/\Delta_{\text{droite}}$ )
  - ◆ Sélection statistique ( $P = 10\%$ ) des **limites du couloir spatial**
- Calculer les **distances temporelles** des positions **dans le couloir spatial** par rapport à  $\tilde{p}$ 
  - ◆ Trier par temps ( $\Delta_{\text{avance}}/\Delta_{\text{retard}}$ )
  - ◆ Sélection statistique ( $P = 10\%$ ) des **limites du couloir temporel**

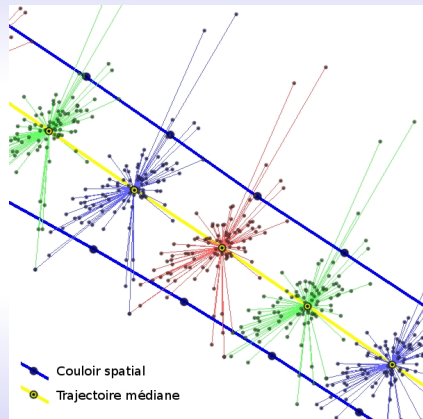


# Couloir spatio-temporel

- ➡ Calcul d'un **couloir spatio-temporel** autour de la **trajectoire type** contenant la majorité des trajectoires du *GHT*

**Apparier** les trajectoires du *GHT* à la trajectoire type par la méthode de **Fréchet**

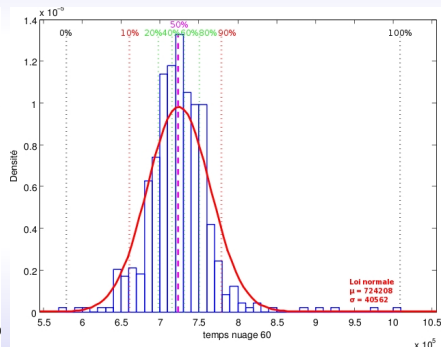
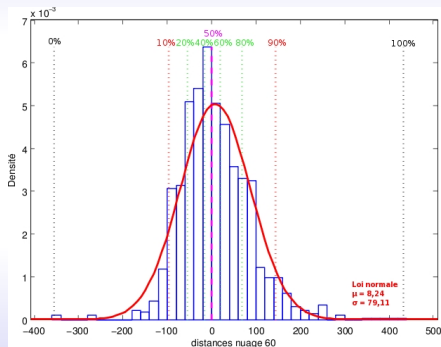
- Calculer les **distances spatiales** par rapport à  $\tilde{p}$ 
  - ◆ Trier par distance ( $\Delta_{\text{gauche}}/\Delta_{\text{droite}}$ )
  - ◆ Sélection statistique ( $P = 10\%$ ) des **limites du couloir spatial**
- Calculer les **distances temporelles** des positions **dans le couloir spatial** par rapport à  $\tilde{p}$ 
  - ◆ Trier par temps ( $\Delta_{\text{avance}}/\Delta_{\text{retard}}$ )
  - ◆ Sélection statistique ( $P = 10\%$ ) des **limites du couloir temporel**



# Analyse des paramètres statistiques du patron

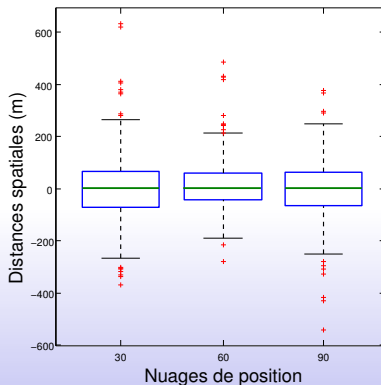
⇒ Analyse statistique de la **distribution** des nuages de positions

➤ distances, temps, vitesses, caps...



# Analyse des paramètres statistiques du patron

- ➡ Analyse statistique de la **distribution** des nuages de positions
  - distance, temps, vitesses, caps...
- ➡ Représentation sous forme de **boîtes à moustaches** (*boxplot*)

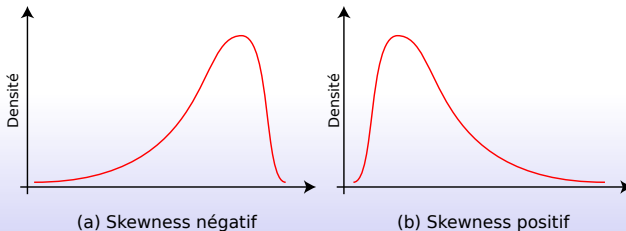


# Analyse des paramètres statistiques du patron

- ➡ Analyse statistique de la **distribution** des nuages de positions
  - distance, temps, vitesses, caps...
- ➡ Représentation sous forme de **boîtes à moustaches** (*boxplot*)
- ➡ Étude des **densités des distributions** des nuages de positions

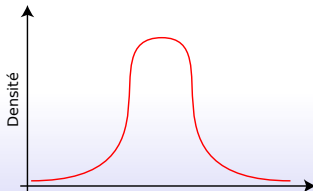
# Analyse des paramètres statistiques du patron

- ➡ Analyse statistique de la **distribution** des nuages de positions
  - distance, temps, vitesses, caps...
- ➡ Représentation sous forme de **boîtes à moustaches** (*boxplot*)
- ➡ Étude des **densités des distributions** des nuages de positions
  - Coefficient d'asymétrie (**Skewness**)

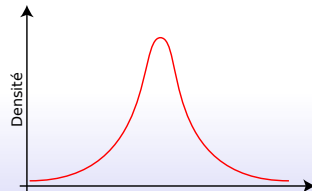


# Analyse des paramètres statistiques du patron

- ➡ Analyse statistique de la **distribution** des nuages de positions
  - distance, temps, vitesses, caps...
- ➡ Représentation sous forme de **boîtes à moustaches** (*boxplot*)
- ➡ Étude des **densités des distributions** des nuages de positions
  - Coefficient d'asymétrie (**Skewness**)
  - Coefficient d'aplatissement (**Kurtosis**)



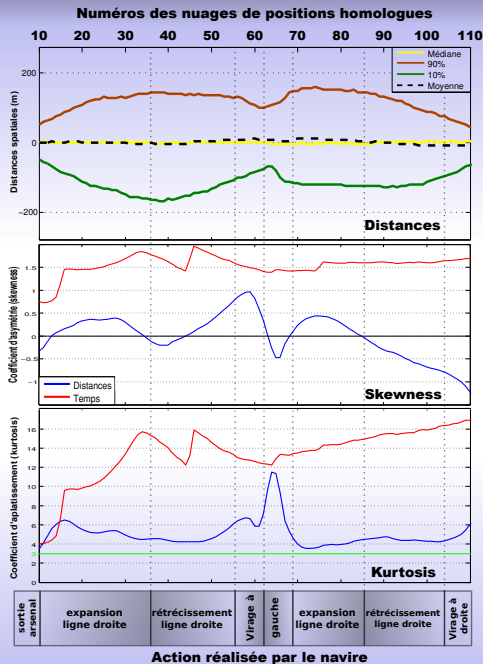
(a) Kurtosis platikurtique ( $<3$ )



(b) Kurtosis leptokurtique ( $>3$ )

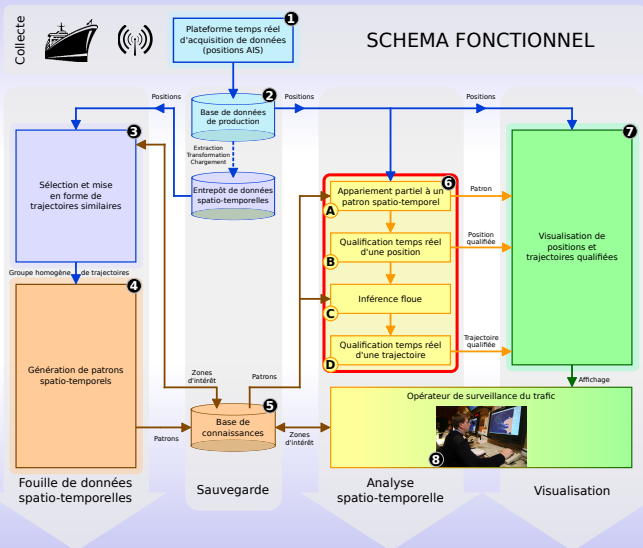


## Motifs de trajectoires



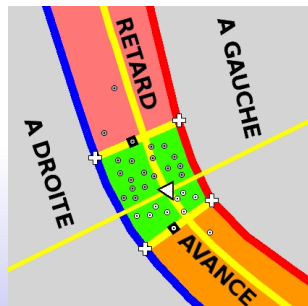
- ▣ Introduction
- ▣ Modélisation des déplacements d'objets mobiles
- ▣ Similarité entre trajectoires
- ▣ Motifs de trajectoires
- ▣ **Qualification spatio-temporelle**
  - ▣ Qualification de positions
  - ▣ Mesures de similarité entre une trajectoire et une route type
  - ▣ Qualification d'une trajectoire
- ▣ Conclusion et perspectives

# Méthodologie



# Qualification d'une position d'objet mobile suivant un itinéraire

- ➡ La **route type de l'itinéraire** est sélectionnée
- Récupérer la **position médiane** au même **temps relatif**
  - Récupérer les **bornes spatio-temporelles** associées
  - Comparer la position à qualifier aux **5 zones spatio-temporelles** définies par les bornes.
- ◆ Position **normale**
  - ◆ Anormalement **à gauche** de la route
  - ◆ Anormalement **à droite** de la route
  - ◆ **En avance** par rapport à la route
  - ◆ **En retard** par rapport à la route



# Qualification d'une position

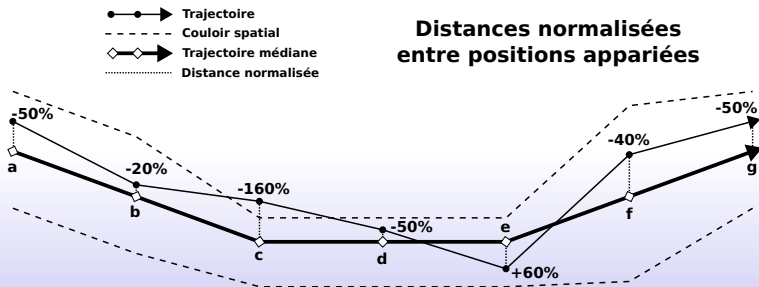
# Qualification d'une trajectoire

- ➡ Comment **qualifier une trajectoire** dans son ensemble ?
  - Grâce aux **routes types**
- ➡ Comment **comparer une trajectoire** à une route type ?
  - En utilisant des **mesures de similarité** entre la trajectoire et la route type
- ➡ Comment **restituer l'information de qualification** à un opérateur ?
  - En limitant le nombre d'informations transmises à un **indice de similarité** avec la route type



## La distance normalisée ( $dS_N$ )

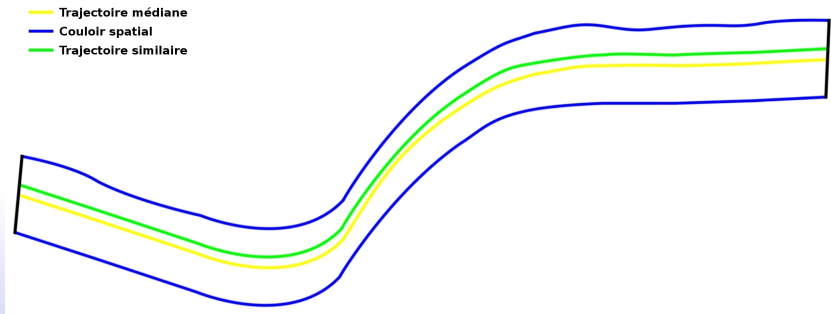
- **Apparier** les positions de la trajectoire avec la route type (**Fréchet semi-partiel**)
- Calculer les **distances spatiales et temporelles** entre les **positions homologues**
- **Normaliser** ces distances par rapport au couloir spatio-temporel (%)



## La distance spatiale/temporelle moyenne

- ▣ La trajectoire reste-t-elle globalement **à l'intérieur du couloir** ?

$$DSm(T, \tilde{T}) = \text{Moyenne}(|dS_N(p_i, \tilde{p}_j)|)$$

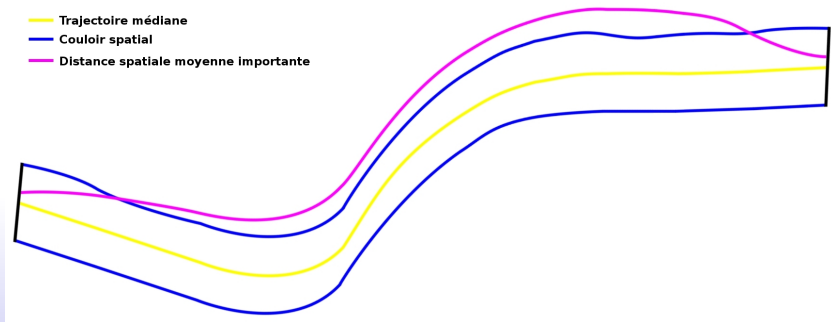




# La distance spatiale/temporelle moyenne

- ▣ La trajectoire reste-t-elle globalement **à l'intérieur du couloir** ?

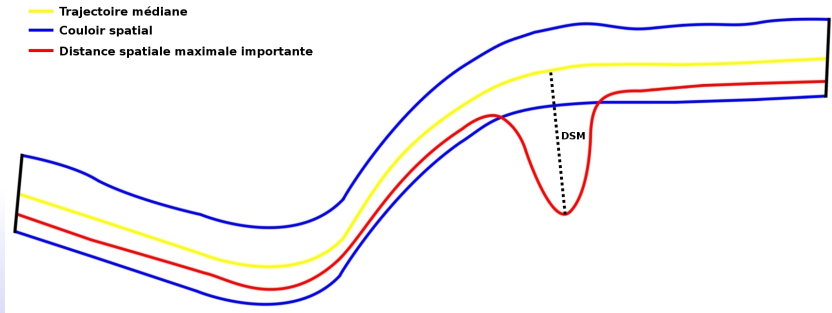
$$DSm(T, \tilde{T}) = \text{Moyenne}(|dS_N(p_i, \tilde{p}_j)|)$$



# La distance spatiale/temporelle maximale

- ▣ La trajectoire **s'écarte-t-elle beaucoup** du couloir ?

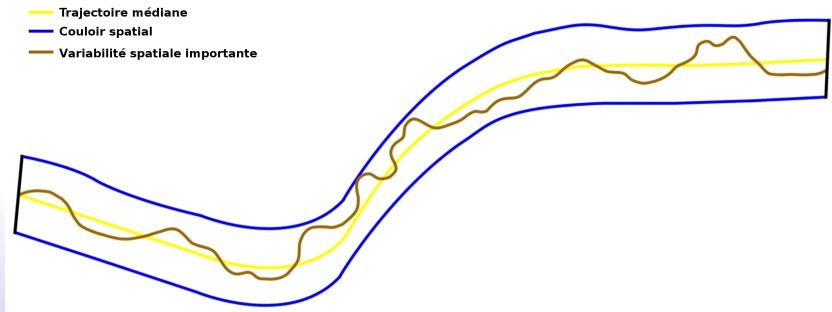
$$DSM(T, \tilde{T}) = \text{Max}(|dS_N(p_i, \tilde{p}_j)|)$$



## La variabilité spatiale/temporelle moyenne

▣ La trajectoire **varie-t-elle beaucoup** par rapport à la route type ?

$$\delta Sm(T, \tilde{T}) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} |dS_N(p_i, \tilde{p}_j) - dS_N(p_{i+1}, \tilde{p}_{j+1})|}{n-1}$$



# La logique floue

- ▣ Comment **combiner** les différentes **mesures de similarité** ?
- ▣ Comment définir un **indice de similarité spatio-temporelle** sans **surcharge cognitive** pour l'opérateur ?

# La logique floue

## La logique floue [Zad78, BM95]

- **Raisonnement flou** proche du raisonnement humain
- **Règles floues** combinant des **variables linguistiques** [MA75]
- Facilite le **recueil d'expertise** et la formulation des règles

Règle :

Si la *moyenne des écarts spatiaux* est **faible**  
ET l'*écart spatial maximal* est **faible**  
ALORS *la similarité spatiale* est **forte**

Légende :

Implication

Conjonction

*Variable linguistique*

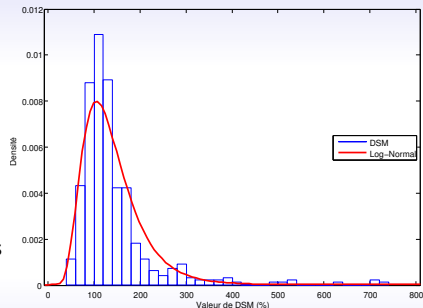
Prédicat

Conclusion

**Terme linguistique**

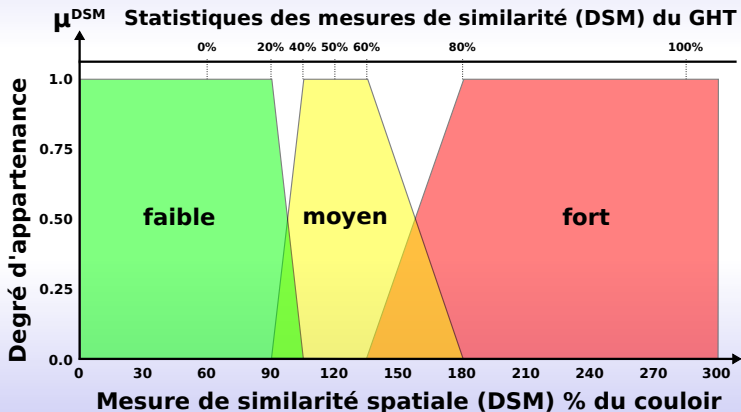
# Les variables floues

- ▣ Comment **transformer** une **mesures de similarité** en **variable floue** ?
  - Faible
  - Moyen
  - Fort
- ▣ Comment définir ces **ensembles flous** et les **fonctions d'appartenance** associées ?
  - Par une **analyse statistique** des mesures de similarité du *GHT* de la route type



# Les ensembles flous

- ⇒ Définition des **limites des ensembles flous** à partir des **percentiles statistiques** des **mesures de similarité**

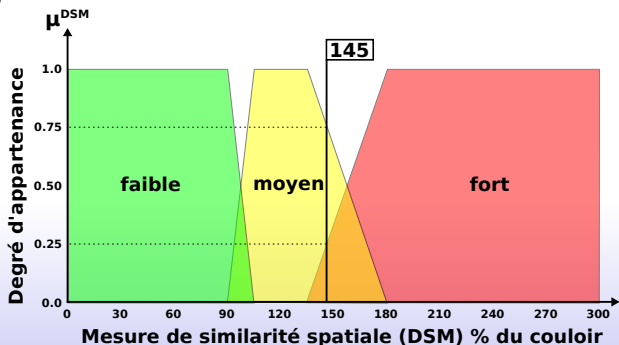


# Fuzzification des mesures de similarité

Comment **obtenir le degré d'appartenance** d'une **mesure de similarité** à un **ensemble flou** ?

➤ Fuzzification de la mesure de similarité  $DSM = 145\%$

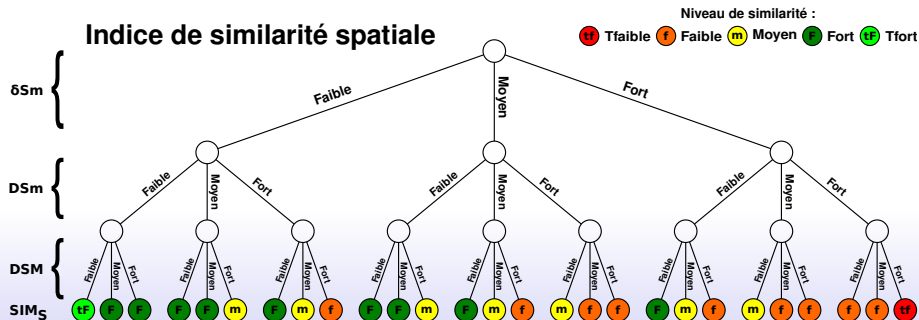
- ◆ Faible : 0%
- ◆ Moyen : 75%
- ◆ Fort : 25%





# Définition des règles floues

- ➔ Définition de **règles floues** en utilisant un **arbre de décision** combinant les différentes **mesures de similarité fuzzifiées**



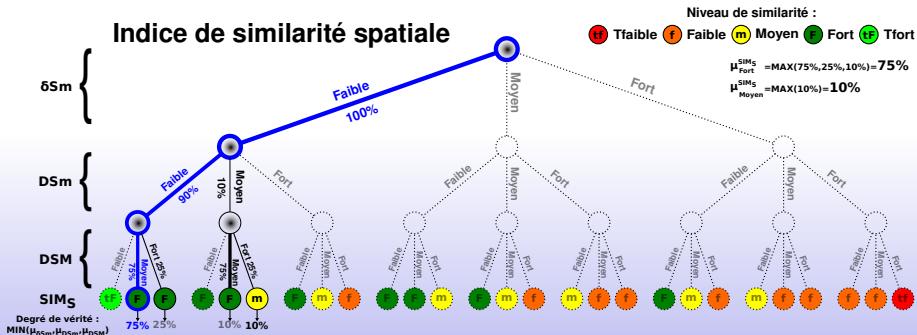
## Degré de vérité des règles floues

➡ Le **degré d'activation d'une règle floue** est dépendant du **degré de vérité des variables floues** qui la compose

➤ Opérateurs de Mamdani (min/max) [MA75]

- ◆  $\delta Sm \rightarrow$  Faible : **100%**
- ◆  $DSm \rightarrow$  Faible : **90%**, Moyen : **10%**
- ◆  $DSM \rightarrow$  Moyen : **75%**, Fort : **25%**

☞ Le degré d'activation de la branche de l'arbre de décision vaut :  
**MIN(100%,90%,75%)=75%**



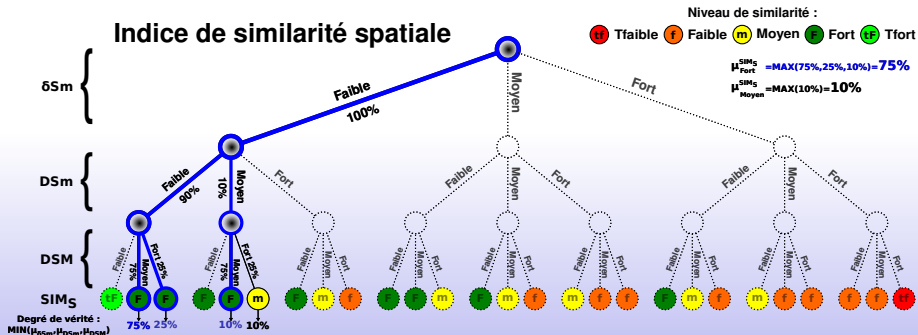
# Degré de vérité des règles floues

- ➡ Le **degré d'activation d'une règle floue** est dépendant du **degré de vérité des variables floues** qui la compose

- Opérateurs de Mamdani (min/max) [MA75]

- ◆  $\delta Sm \rightarrow$  Faible : 100%
- ◆  $DSm \rightarrow$  Faible : 90%, Moyen : 10%
- ◆  $DSM \rightarrow$  Moyen : 75%, Fort : 25%

- 📄 L'indice de similarité  $SIM_S = \text{Fort}$  est activée par 3 différentes règles :  
 $\text{MAX}(75\%, 25\%, 10\%) = 75\%$



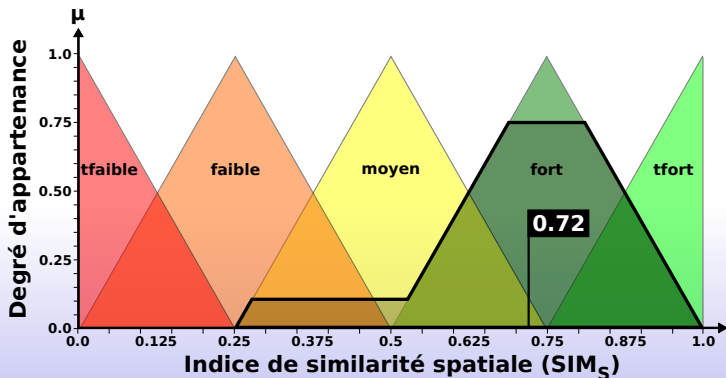
# Défuzzification des indices de similarité

► Comment obtenir la **valeur de l'indice de similarité spatiale/temporelle** ?

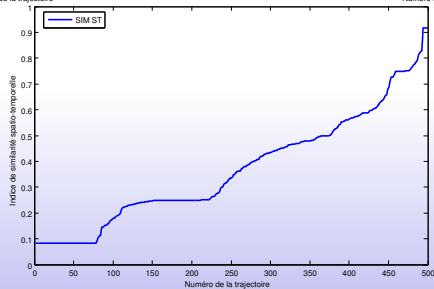
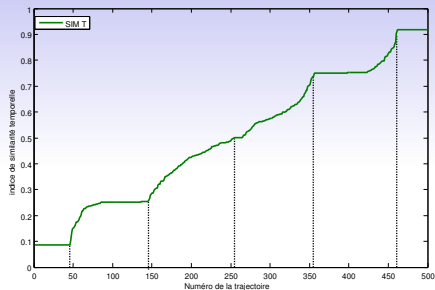
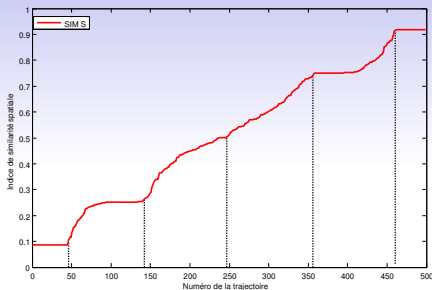
➤ Méthode du **centre de gravité** [Jan98]

◆  $SIM_S$  Moyen : 10%

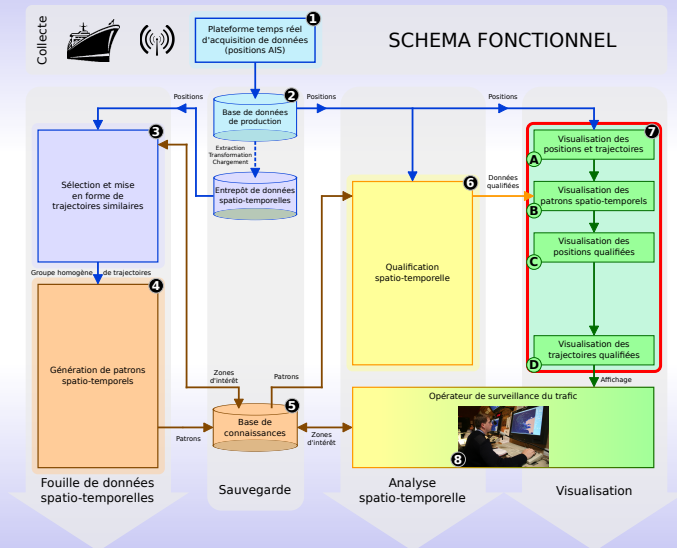
◆  $SIM_S$  Fort : 75%



# Indices de similarité des trajectoires du *GHT*



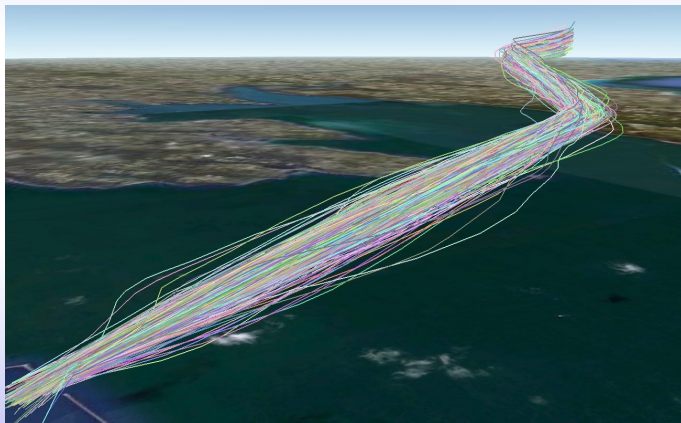
# Méthodologie



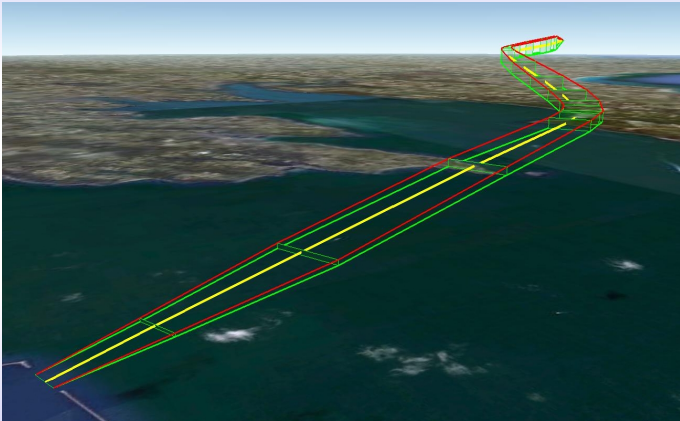
# Proposition de visualisation des trajectoires

- Comment **visualiser** les **routes types** et les **positions/trajectoires qualifiées** ?

Dans un **cube spatio-temporel 3D** (axe Z = temps) [ERM11]

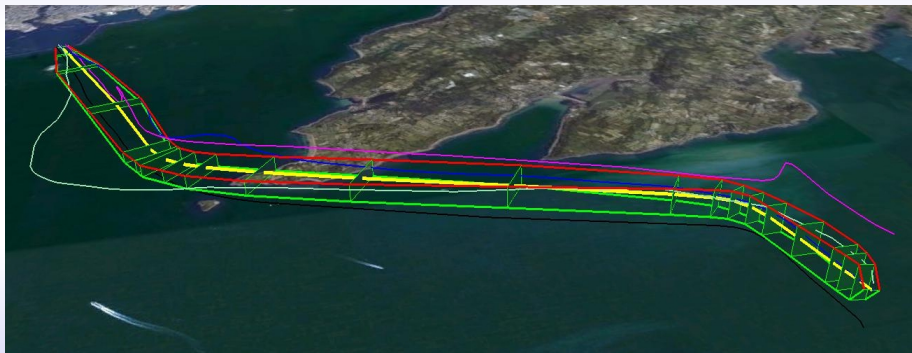


# Proposition de visualisation de patrons spatio-temporels



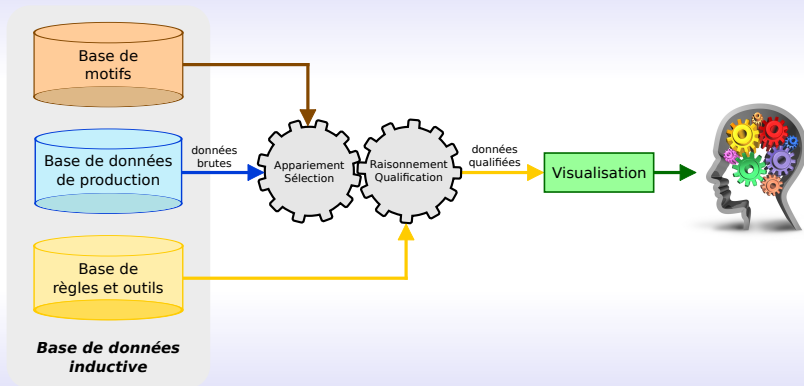


# Proposition de visualisation de trajectoires anormales



- Introduction
- Modélisation des déplacements d'objets mobiles
- Similarité entre trajectoires
- Motifs de trajectoires
- Qualification spatio-temporelle
- Conclusion et perspectives

# Base de donnée inductive



# Apport de la thèse

- **Modèle** de **trajectoires** évoluant dans un **espace ouvert**
- Définition d'un **processus fonctionnel** d'aide à la décision
- **Extraction de connaissances** dans des bases de données spatio-temporelles
  - **Patrons spatio-temporels de trajectoires** → **routes types**
- Outil de **qualification de positions**
  - Segmentation temporelle de l'espace géographique
- Outil de **qualification de trajectoires**
  - Technique d'**appariement de trajectoires** à un patron
  - **Mesures de similarité** entre une trajectoire et un patron
  - **Ensembles flous** basés sur une **analyse statistique** de ces mesures
  - Système de **raisonnement flou** combinant les mesures de similarité afin de **diminuer la charge cognitive des opérateurs**
- Implémentation d'un **prototype fonctionnel** appliqué à un jeu de données maritimes conséquent

# Publications

**T. Devogele, L. Etienne, and A. Bouju.**

Mesures de similarité de trajectoires suivant le même itinéraire.

In [Conférence internationale de Géomatique et Analyse Spatiale SAGEO'10](#), 2010.

**L. Etienne, T. Devogele, and A. Bouju.**

Outils d'aide aux décideurs concernant le suivi de navires : détection de trajectoires inhabituelles.

In [7ème journées scientifiques et techniques du CETMEF](#), 2008.

**L. Etienne, T. Devogele, and A. Bouju.**

Analyse de similarité de trajectoires d'objets mobiles suivant le même itinéraire : Application aux trajectoires de navires.

[Ingénierie des Systèmes d'Information](#), 14(5/2009), pages 85–106, 2009.

**L. Etienne, T. Devogele, and A. Bouju.**

Analyse temps réel du comportement d'objets mobiles évoluant dans un espace ouvert.

In [Actes du 5ème atelier Représentation et raisonnement sur le temps et l'espace \(RTE 2010\)](#), 2010.

**L. Etienne, T. Devogele, and A. Bouju.**

Spatio-temporal trajectory analysis of mobile objects following the same itinerary.

In [Proceedings of the International Symposium on Spatial Data Handling \(SDH\)](#), pages 86–91, 2010.

**L. Etienne, C. Ray, and G. Mcardle.**

Spatio-temporal visualisation of outliers.

In [Proceedings of the international workshop on Maritime Anomaly Detection \(MAD\)](#), page 119, 2011.

**L. Etienne.**

Similarity analysis and visualization of trajectories for mobile objects following the same route ; application to ships.

Sea Tech Week international conference on Marine Science and Technology, 2008.

## Perspectives de la thèse

- ▣ Parfaire l'**analyse statistique**  
(distributions multimodales, skewness/kurtosis)
- ▣ Étudier la possibilité de **généralisation des patrons**  
(agrégation ?)
- ▣ Améliorer la **géovisualisation** des trajectoires aberrantes
- ▣ Appliquer cette analyse à **différents types d'objets mobiles**  
(piétons, animaux...)
- ▣ Étudier des **retours d'experts** du domaine applicatif  
(définition de nouvelles règles floues...)



# Références I



**B. Aronov, S. Har-Peled, C. Knauer, Y. Wang, and C. Wenk.**

Fréchet distance for curves, revisited.

[Algorithms–ESA 2006](#), pages 52–63, 2006.



**R. Agrawal, T. Imieliński, and A. Swami.**

Mining association rules between sets of items in large databases.

In [ACM SIGMOD Record](#), volume 22, pages 207–216. ACM, 1993.



**R. Agrawal, K. Lin, H.S. Sawhney, and K. Shim.**

Fast similarity search in the presence of noise, scaling, and translation in time-series databases.

In [Proceedings of the 21th International Conference on Very Large Data Bases](#). Citeseer, 1995.



**H. Alt.**

The computational geometry of comparing shapes.

In Susanne Albers, Helmut Alt, and Stefan Näher, editors, [Efficient Algorithms](#), volume 5760 of [Lecture Notes in Computer Science](#), pages 235–248. Springer Berlin / Heidelberg, 2009.



**B. Bouchon-Meunier.**

[La logique floue et ses applications.](#)

Addison-Wesley France, 1995.



**L. Chen, M. T. Oszu, and V. Oria.**

Robust and fast similarity search for moving object trajectories.

In [SIGMOD '05 : Proceedings of the 2005 ACM SIGMOD international conference on Management of data](#), pages 491–502, New York, NY, USA, 2005. ACM.



## Références II



### T. Devogele.

A new merging process for data integration based on the discrete fréchet distance.

In [Advances in Spatial Data Handling : 10th International Symposium on Spatial Data Handling](#), pages 167–181. Springer Verlag, 2002.



### L. Etienne, C Ray, and G. Mcardle.

Spatio-temporal visualisation of outliers.

In [Proceedings of the international workshop on Maritime Anomaly Detection \(MAD\)](#), page 119, 2011.



### C. Faloutsos, HV Jagadish, A.O. Mendelzon, and T. Milo.

A signature technique for similarity-based queries.

In [Compression and Complexity of Sequences 1997. Proceedings](#), pages 2–20. IEEE, 1997.



### M. Fréchet.

Sur l'écart de deux courbes et sur les courbes limites.

[Transactions of the American Mathematical Society](#), 6(4) :435–449, 1905.



### F. Hausdorff.

Dimension und äußeres Maß.

[Mathematische Annalen](#), 79(1) :157–179, 1918.



### K. Hornsby and M.J. Egenhofer.

Modeling moving objects over multiple granularities.

[Annals of Mathematics and Artificial Intelligence](#), 36(1) :177–194, 2002.

## Références III



### T. Hägerstrand.

What about people in regional science?  
[Papers in Regional Science](#), 24(1) :6–21, 1970.



### C.Z. Janikow.

Fuzzy decision trees : Issues and methods.  
[IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B : Cybernetics.](#), 28(1) :1–14, 1998.



### E. Keogh and C.A. Ratanamahatana.

Exact indexing of dynamic time warping.  
[Knowledge and Information Systems](#), 7(3) :358–386, 2005.



### V.I. Levenshtein.

Binary codes capable of correcting deletions, insertions, and reversals.  
In [Soviet Physics Doklady](#), volume 10, page 707, 1966.



### E.H. Mamdani and S. Assilian.

An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller.  
[International Journal of Man-Machine Studies](#), 7(1) :1 – 13, 1975.



### R.B. McMaster.

A statistical analysis of mathematical measures for linear simplification.  
[Cartography and Geographic Information Science](#), 13(2) :103–116, 1986.

# Références IV



## H. Sakoe and S. Chiba.

Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition.

[IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing](#), 26 :43–49, 1978.



## S. Spaccapietra, C. Parent, M.L. Damiani, J.A. de Macedo, F. Porto, and C. Vangenot.

A conceptual view on trajectories.

[Data & Knowledge Engineering](#), 65(1) :126–146, 2008.



## M. Vlachos, M. Hadjieleftheriou, D. Gunopulos, and E. Keogh.

Indexing multi-dimensional time-series with support for multiple distance measures.

In [Proceedings of the ninth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining](#), pages 216–225. ACM, 2003.



## L.A. Zadeh.

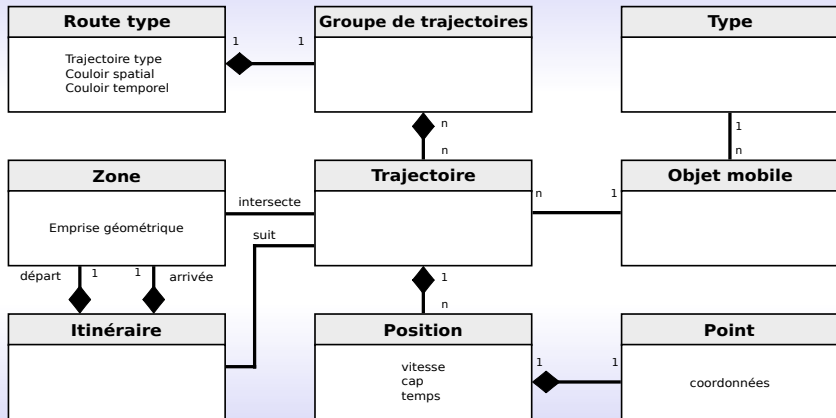
Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility.

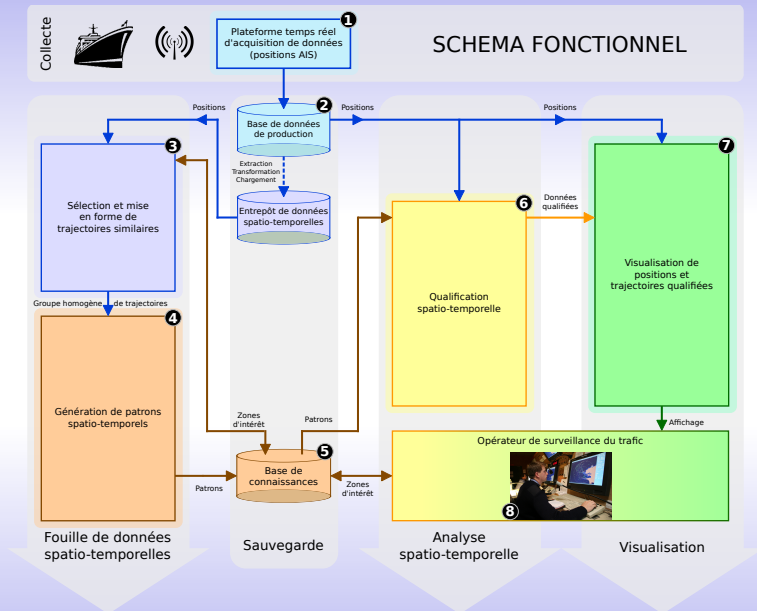
[Fuzzy Sets and Systems](#), 1(1) :3–28, 1978.

## Liste des annexes

- Extrait de modèle UML
- Schéma fonctionnel simplifié
- Schéma fonctionnel détaillé
- Dynamic Time Warping (*DTW*)
- Distance d'édition et *LCSS*
- Appariement de Fréchet partiel
- Distance de Hausdorff
- Exemple de qualification de trajectoire
- Routes types "Brest-Lanvéoc"
- Routes types "Calais-Douvres"
- Routes types "Pas de Calais"

## Extrait de modèle UML



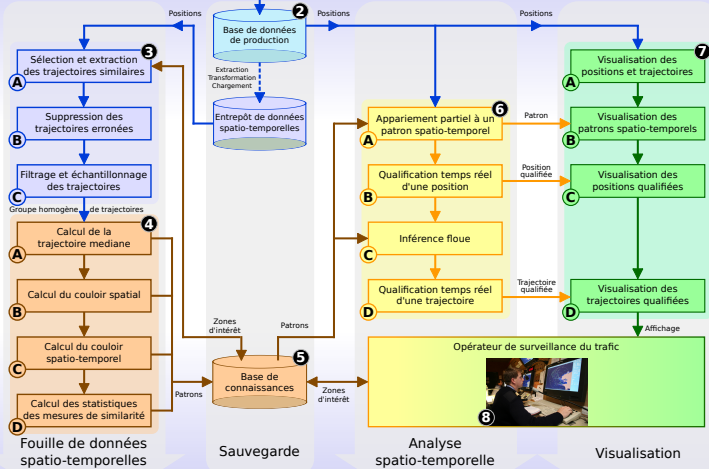


Collecte



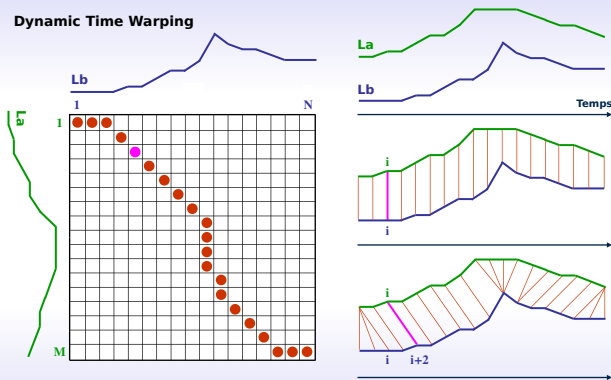
1  
Plateforme temps réel  
d'acquisition de données  
(positions AIS)

## SCHEMA FONCTIONNEL



# Dynamic Time Warping (*DTW*)

## Dynamic Time Warping



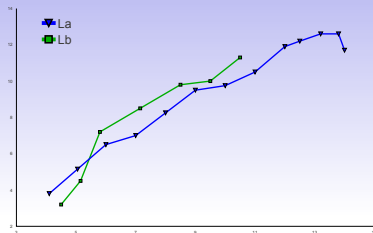


## Distance d'édition et *LCSS*

		<b>G</b>	<b>A</b>	<b>R</b>	<b>V</b>	<b>E</b>	<b>Y</b>
	0	1	2	3	4	5	6
<b>A</b>	1	1	1	2	3	4	5
<b>V</b>	2	2	2	2	2	3	4
<b>E</b>	3	3	3	3	3	2	3
<b>R</b>	4	4	4	3	4	3	3
<b>Y</b>	5	5	5	4	4	4	3

Diagram illustrating the edit distance matrix for the strings "GARVEY" and "AVERY". The matrix shows the edit distance between prefixes of the two strings. The characters G, A, R, V, E, and Y are highlighted in blue, black, blue, magenta, magenta, and green respectively. The value 3 in the bottom-right cell (Y, Y) is highlighted in green. Annotations include "Ajout" (Addition) for the transition from (0,1) to (1,1) and (1,1) to (1,2), and "Supp" (Deletion) for the transition from (3,6) to (4,6).

## Modèle



## Ligne a

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Xa	4,1	5,05	6	7	8	9	10	11	12	12,5	13,2	13,8	14
Ya	3,8	5,15	6,5	7	8,25	9,5	9,75	10,5	11,9	12,2	12,6	12,6	11,7

## Ligne b

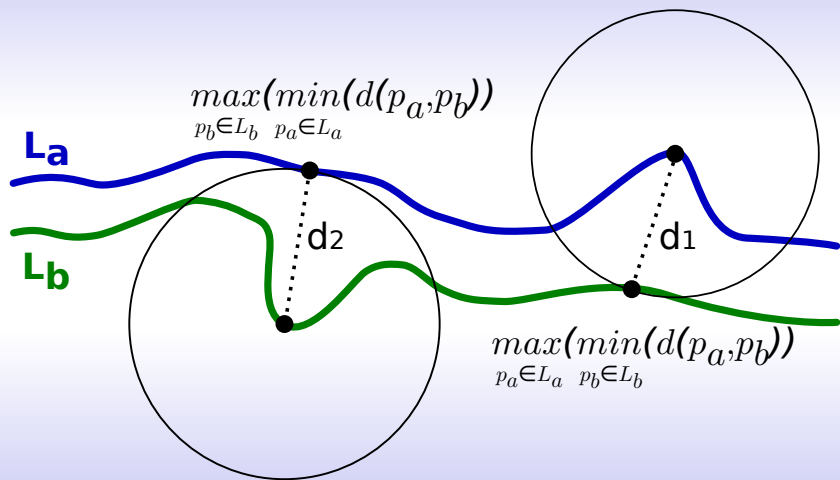
## Matrice de distances

N°	Xb	Yb	MD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	4,5	3,2	1													
2	5,2	4,5	2	0,72												
3	5,8	7,2	3	1,26	0,66											
4	7,2	8,5	4	3,80	2,18	0,73	1,22									
5	8,5	9,8	5	5,60	3,95	2,31	1,51	0,89								
6	9,5	10	6	7,44	5,79	4,14	3,18	1,63	0,58							
7	11	11	7	8,22	6,58	4,95	3,91	2,30	0,71	0,56	1,58	3,14	3,72	4,52	5,02	4,81
				9,86	8,22	6,58	5,54	3,94	2,34	1,63	0,94	1,62	2,19	3,00	3,55	3,52

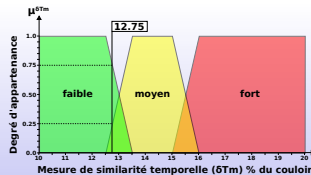
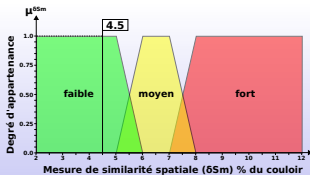
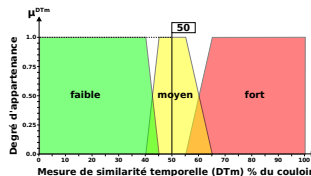
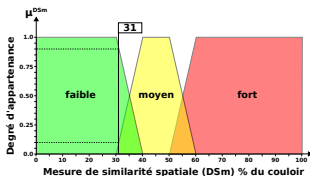
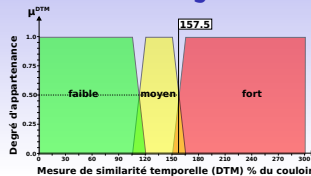
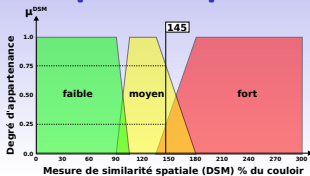
## Matrice de Fréchet

MF	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0,72	2,03	3,62	4,55	6,14	7,74	8,55	9,77	11,49	12,04	12,81	13,22	13,22
2	1,26	0,72	2,17	3,11	4,71	6,31	7,15	8,38	10,08	10,64	11,42	11,85	11,85
3	3,80	2,18	0,73	1,22	2,44	3,94	4,91	6,16	7,78	8,36	9,16	9,65	9,65
4	5,60	3,95	2,31	1,51	1,22	2,10	3,11	4,34	5,92	6,50	7,31	7,81	7,81
5	7,44	5,79	4,14	3,18	1,63	1,22	1,50	2,60	4,08	4,66	5,47	5,99	5,99
6	8,22	6,58	4,95	3,91	2,30	1,22	1,22	1,58	3,14	3,72	4,52	5,02	5,02
7	9,86	8,22	6,58	5,54	3,94	2,34	1,63	1,22	1,62	2,19	3,00	3,55	3,55

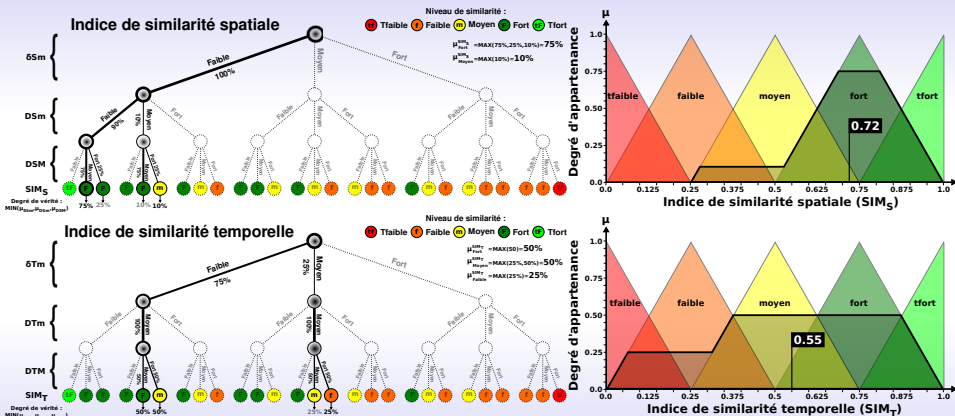
# Distance de Hausdorff



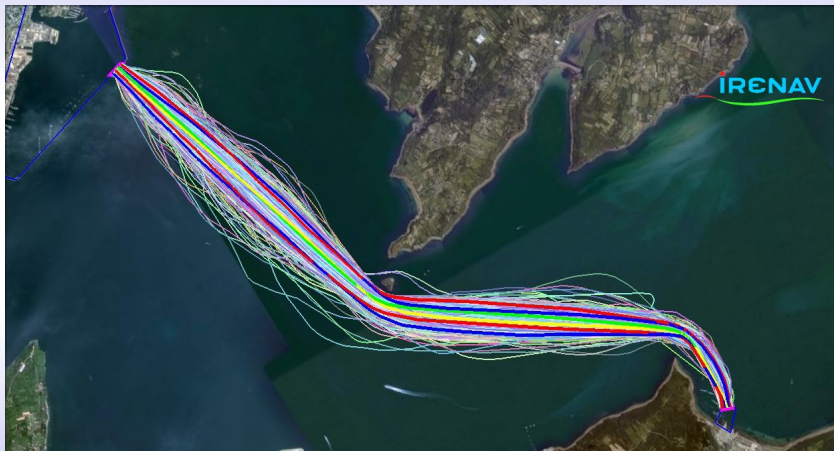
# Exemple de qualification de trajectoire



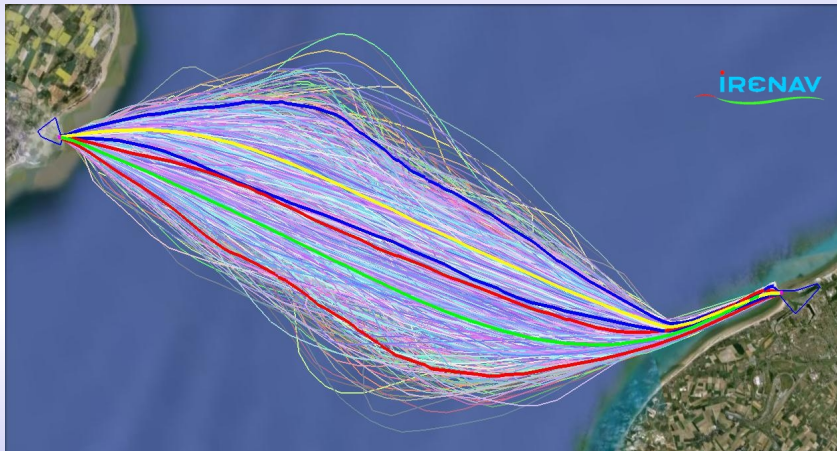
# Exemple de qualification de trajectoire



## Route type "Brest-Lanvéoc" (aller-retour)



## Route type "Calais-Douvres" (aller-retour)



## Route type "Pas de Calais" (aller-retour)

