

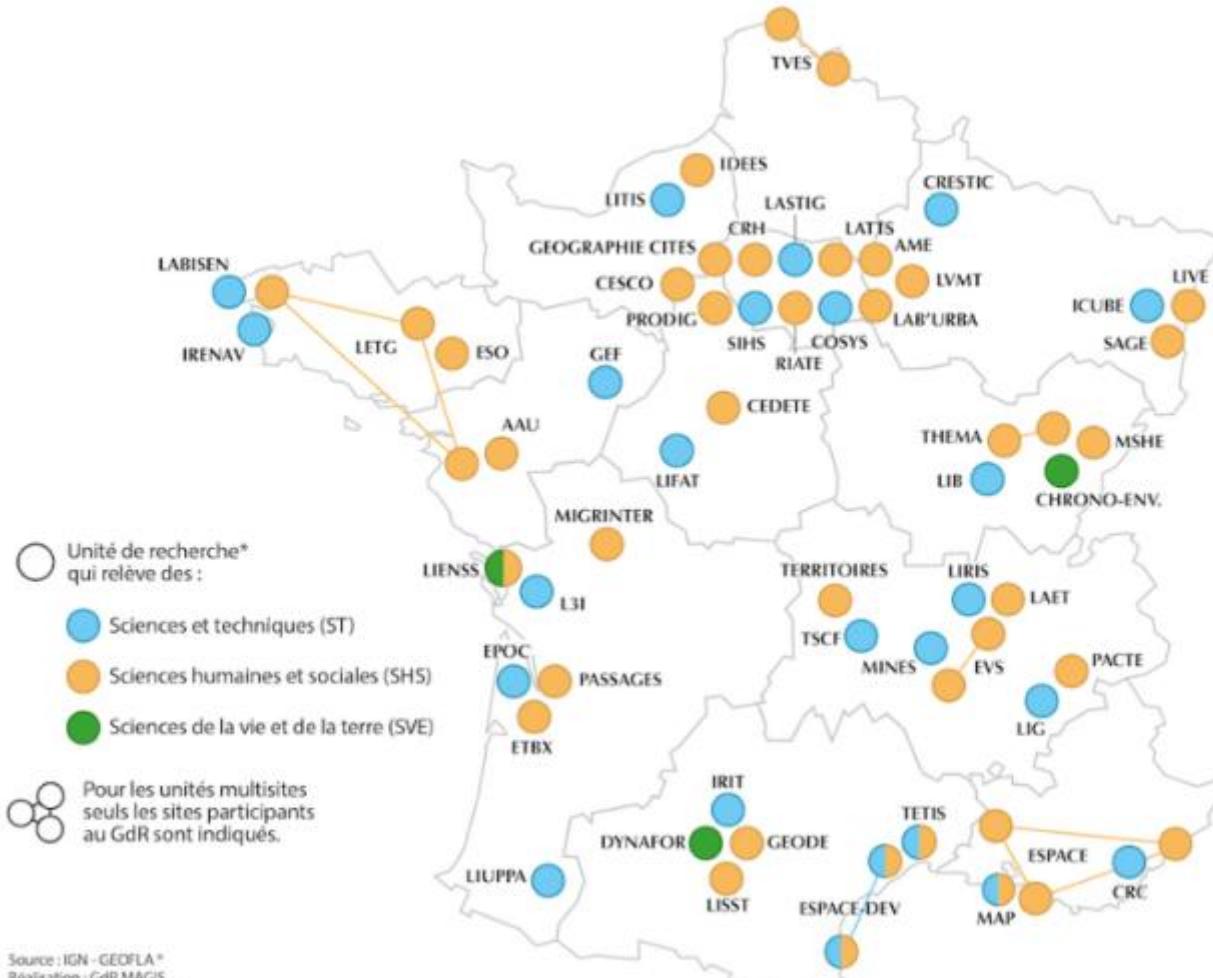
Données géographiques et incertitude

François Pinet, INRAE

Laboratoire Technologies et Systèmes
d'information pour les agrosystèmes

francois.pinet@inrae.fr

Le GdR CNRS MAGIS 2022 - 2026



Les axes de recherche du GDR MAGIS

Au-Delà de la 3DInformation géographique volontaire et
crowdsourcing

Observatoires scientifiques Milieux-Sociétés

Ontologies pour l'interdisciplinarité

Incertitude épistémique

Mobilités et impacts socio-environnementaux

Humanités Numériques Spatialisées

Graphes de Connaissances Géohistoriques(Carto)graphies et (Géo)visualisations de donnéesObservation de la Terre Multi-Capteurs pour le Suivi
des Milieux

Espaces côtiers et marins

Géomatique, Ville, Climat et Pollution

Usages du calcul hautes performances en
Géomatique

L'axe Incertitude du GDR MAGIS

Animateurs :

Mireille Batton-Hubert, Ecole des Mines St Etienne, LIMOS

Eric Desjardin, Univ. De Reims, CReSTIC

François Pinet, INRAE Clermont, TSCF

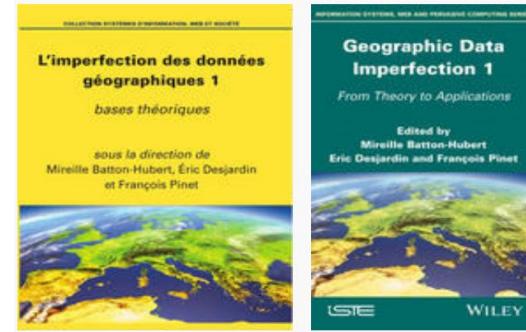


L'axe Incertitude du GDR MAGIS

Description :

- **Travail de réflexion et de prospective sur l'incertitude épistémique en géomatique :**
 - Liée au manque de connaissances
 - Incertitudes dans les sources d'information
- **Démarrage en 2012** : création du projet d'action au sein de la session du GDR qui a commencé en 2013.
- **Ateliers/réunions à** : Saint-Etienne, Paris, Lyon, Montpellier, Clermont-Ferrand, Grenoble, Québec, Avignon.
- **Ateliers/réunions sur le sujets** : définitions des concepts, des représentation, des traitements ; projet d'ouvrages

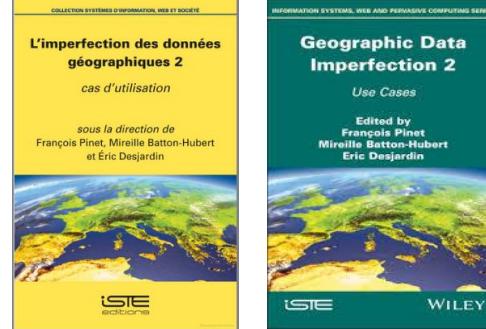
- **Projet ouvrage** : A constitué un moyen pour réaliser une animation
- **Rédaction de 2 livres, en 17 chapitres et une quarantaine d'auteurs ; 20 labos (+ les idées des non-auteurs)**
- **2013-2016** : Réalisation du plan pour 2 ouvrages
- **2017-2019** : Rédaction tome I
- **2020-2023** : Rédaction tome II



Tome 1 « La théorie »

2019

- **Concepts et terminologies** (UMR EspaceDev Montpellier, Labo d'info de Tours)
- **Origines de l'imperfection** (École Supérieure d'ingénieurs Géomètres et Topographes - Mans, Univ. Montpellier 3, LASTIG - IGN, École Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse)
- **Intégrité et confiance dans les données** (Ecole Navale de Brest, Mines ParisTech – Sophia Antipolis)
- **Formalismes et représentation des objets** (Ecole des Mines de St Etienne, TSCF - INRAE)
- **Représentation des modèles de données** (TSCF – INRAE, Labo d'info de Tours)
- **Relations topologiques et raisonnement** (Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg)
- **Raisonnement en logique modale** (Univ. de Bourgogne)
- **Révision itérative de l'imperfection** (UMR ESPACE – Nice, Avignon)
-
- **Aide à la décision** (LAMSADE Paris)



Tome 2 « Cas d'usage »

2024

- **Pulvérisation/Epandage en agriculture** (Ecole des Mines de St Etienne, TSCF – INRAE, UMR TETIS)
- **Evolution du registre parcellaire** (Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg, Icube Strasbourg)
- **Anonymisation des données agricoles** (École Supérieure d'ingénieurs Géomètres et Topographes - Mans)
- **Risques naturels** (Univ. Montpellier 3)
- **Localisation de victime en montagne** (LASTIG – IGN, Labo d'info de Grenoble)
- **Foncier** (UMR Espace)
- **Représentation de l'espace urbain pour les personnes en situation d'handicap visuel** (Labo d'info de Clermont-Ferrand)

Évènements

Atelier « IDOMOG : représentation et gestion de l'Incertitude des Données et des Modèles en Géomatique ». 5 Juin 2023, Québec

- Présentation d'un état de l'art sur le sujet et rappel des actions de l'atelier
- Réflexion Franco-Canadienne sur de nouveaux sujets d'intérêt pour l'action.
Quelques idées qui sont ressorties :
 - Données spatiales fake sur le Web, désinformation
 - Perception de la représentation cartographique de l'incertitude par les décideurs
 - Différences entre comment les francophones et les anglophones US s'intéressent au sujet :
 - FR : Souvent intéressés par les concepts généraux (ex. différence entre les types d'incertitudes, etc.)
 - US : Souvent intéressés par les outils (mesures, traitements, etc.)

Évènements

Journées en 2024 de présentation des résultats de l'axe, IGN - Saint-Mandé

- Journées de restitution de l'action 2012-2024

Atelier à SAGEO 2025, Avignon

Définition de la feuille de route pour 2026 :

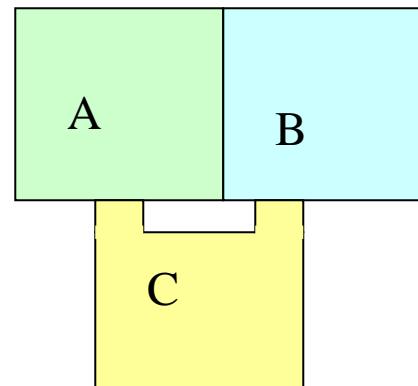
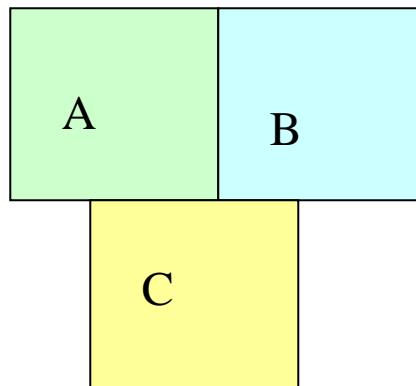
- Projet de vidéo de présentation de la problématique
- Projet de mise à disposition de code ou de données
- Réflexion IA et géomatique à aborder

A suivre en 2026

Quelques modèles de représentation de l'incertain en géomatique

Modèles d'objets et relations topologiques

- Les relations topologiques sont utiles pour l'analyse et le contrôle des données, ainsi leur requêtage
- Les SGBD intègrent certaines d'entre elles
- La formalisation des relations topologiques est un sujet de recherche ancien
- Question : comment formaliser les relations topologiques afin de mieux distinguer les différentes configurations spatiales



Représentation des objets et leurs relations topologiques

Relations topologiques : Calculus-Based Method

(Clementini et al., SSD'93. 1993; Clementini et al., Information Systems, 1995)

- *touch*:



$$\langle A, \text{touch}, B \rangle \Leftrightarrow (A^\circ \cap B^\circ = \emptyset) \wedge (A \cap B \neq \emptyset)$$

- *in*:



$$\langle A, \text{in}, B \rangle \Leftrightarrow (A \cap B = A) \wedge (A^\circ \cap B^\circ \neq \emptyset)$$

- *overlap*:

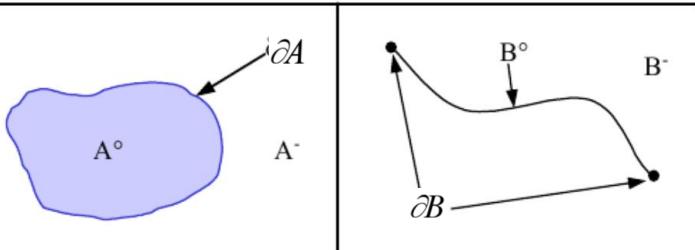


$$\langle A, \text{overlap}, B \rangle \Leftrightarrow (\dim(A^\circ) = \dim(B^\circ) = \dim(A^\circ \cap B^\circ)) \wedge (A \cap B \neq A) \wedge (A \cap B \neq B)$$

- *disjoint*:



$$\langle A, \text{disjoint}, B \rangle \Leftrightarrow A \cap B = \emptyset$$



Représentation des objets et leurs relations topologiques

$$M = \partial A \begin{bmatrix} B^\circ & \partial B & B^- \\ A^\circ & A^\circ \cap \partial B \neq \emptyset & A^\circ \cap B^- \neq \emptyset \\ \partial A \cap B^\circ \neq \emptyset & \partial A \cap \partial B \neq \emptyset & \partial A \cap B^- \neq \emptyset \\ A^- \cap B^\circ \neq \emptyset & A^- \cap \partial B \neq \emptyset & A^- \cap B^- \neq \emptyset \end{bmatrix}$$

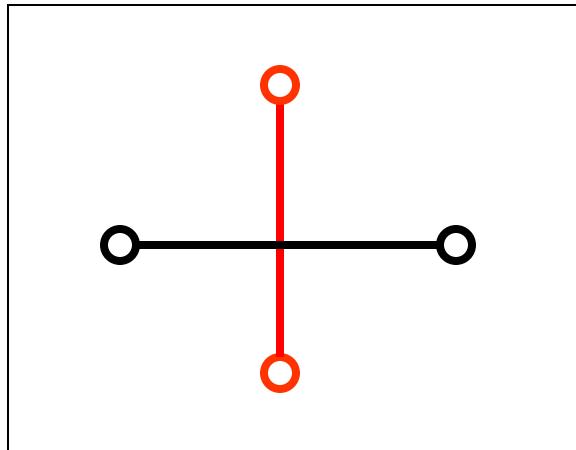
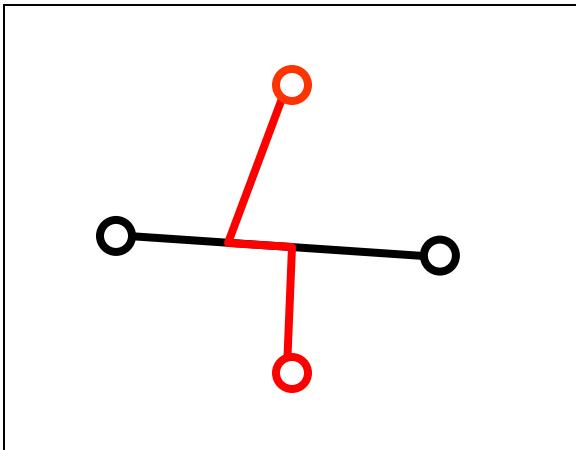
1 matrice = 1 relation topologique

$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
$\langle A, \text{disjoint}, B \rangle$	$\langle A, \text{contains}, B \rangle$	$\langle A, \text{inside}, B \rangle$	$\langle A, \text{equal}, B \rangle$
$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$
$\langle A, \text{meet}, B \rangle$	$\langle A, \text{covers}, B \rangle$	$\langle A, \text{coveredBy}, B \rangle$	$\langle A, \text{overlap}, B \rangle$

(Egenhofer et al., 1990, tech. Report)

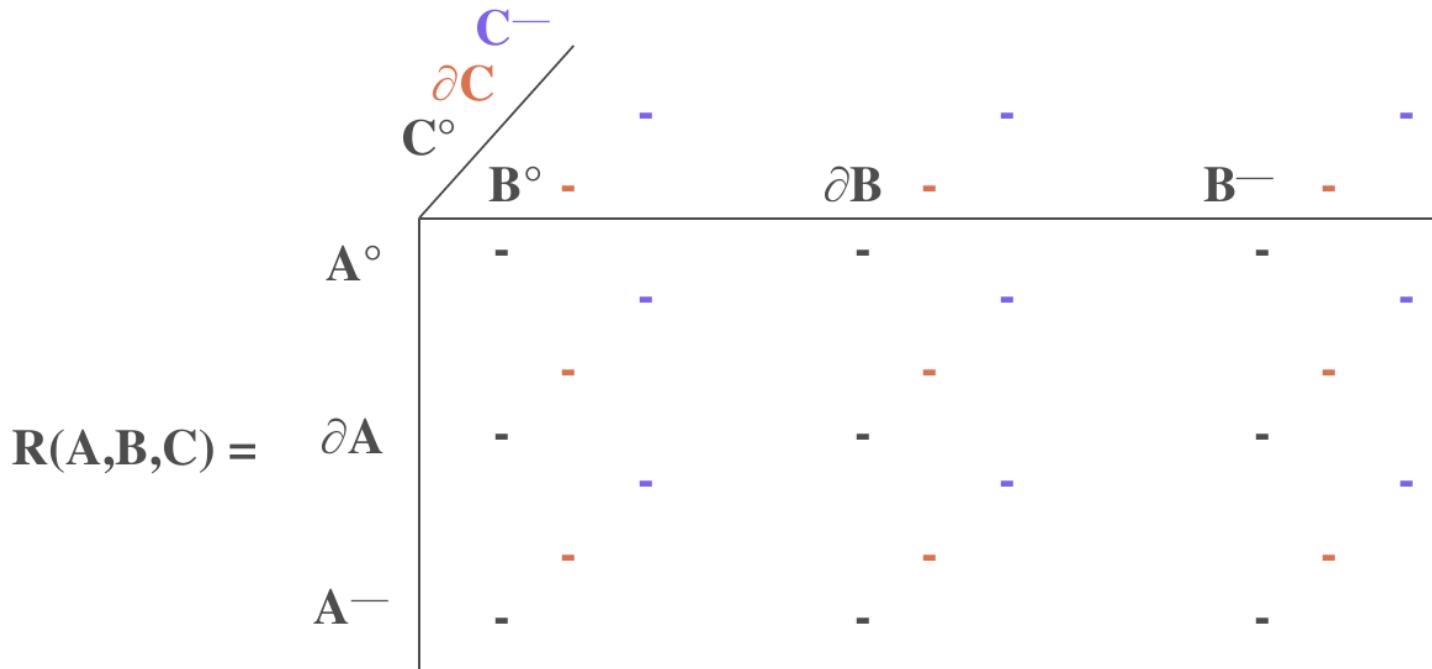
Représentation des objets et leurs relations topologiques

Dimensionally Extended-9IM étend 9IM. On indique la dimension de l'intersection dans les matrices.

		
9IM	$\left[A^\circ \cap B^\circ \neq \emptyset \right] = 1$	$\left[A^\circ \cap B^\circ \neq \emptyset \right] = 1$
DE-9IM	$\left[\dim(I(a) \cap I(b)) \right] = 0D$	$\left[\dim(I(a) \cap I(b)) \right] = 1D$

Représentation des objets et leurs relations topologiques

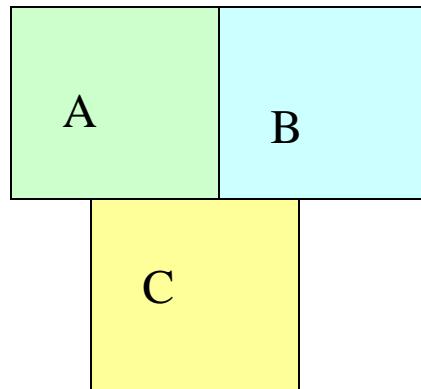
relation ternaire = relation entre 3 objets



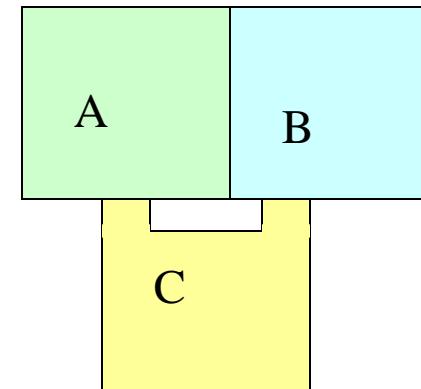
(Favetta, Thèse, 2003)

Représentation des objets et leurs relations topologiques

Si on ne considère que des relations binaires :



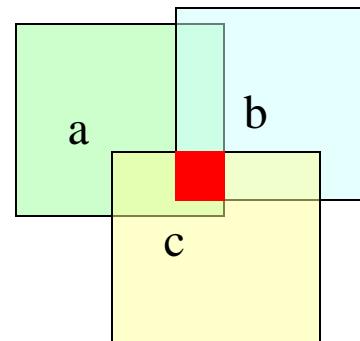
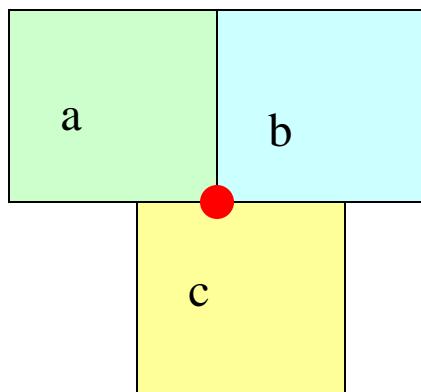
$$\left[\begin{array}{l} \partial A \cap \partial B \neq \emptyset \\ \partial A \cap \partial C \neq \emptyset \\ \partial B \cap \partial C \neq \emptyset \\ \partial A \cap \partial B \cap \partial C \neq \emptyset \end{array} \right] = 1$$



$$\left[\begin{array}{l} \partial A \cap \partial B \neq \emptyset \\ \partial A \cap \partial C \neq \emptyset \\ \partial B \cap \partial C \neq \emptyset \\ \partial A \cap \partial B \cap \partial C \neq \emptyset \end{array} \right] = 1$$

Représentation des objets et leurs relations topologiques

Relations ternaires avec DE-9IM :

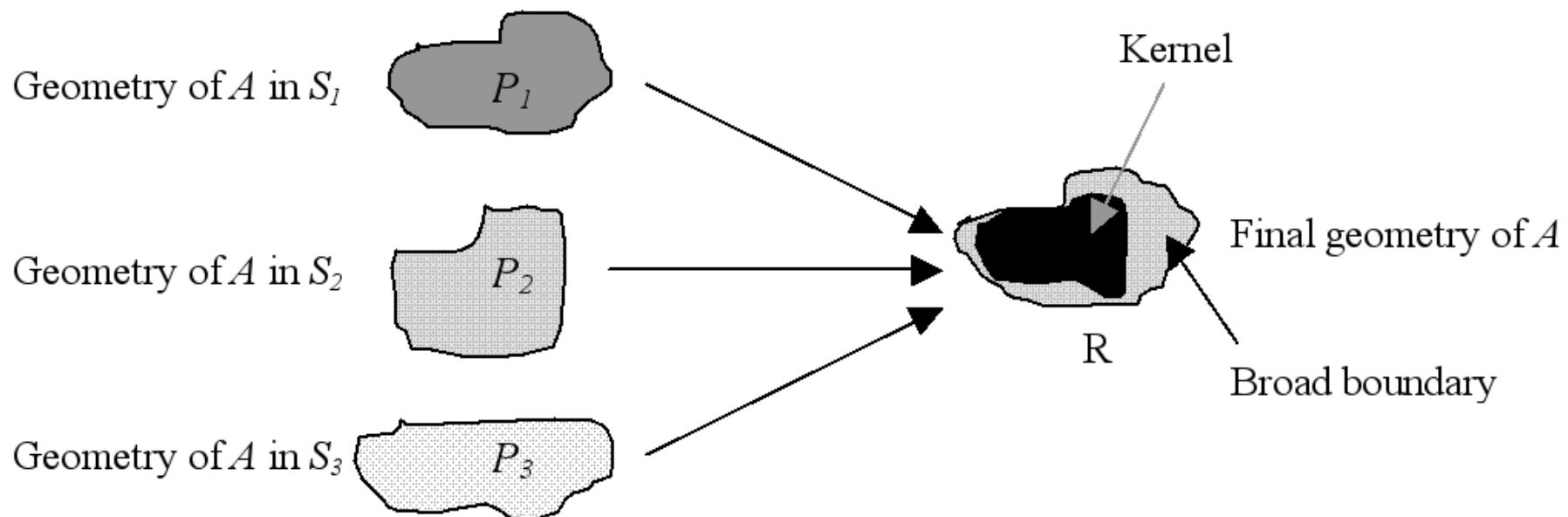


$$\left[\begin{array}{l} \dim(B(a) \cap (B(b) \\ \cap (B(c))) \end{array} \right] = 0D$$

$$\left[\begin{array}{l} \dim(I(a) \cap (I(b) \cap \\ (I(c))) \end{array} \right] = 2D$$

Objets incertains

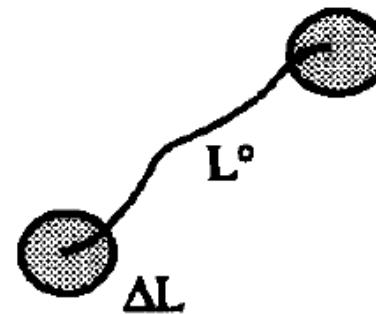
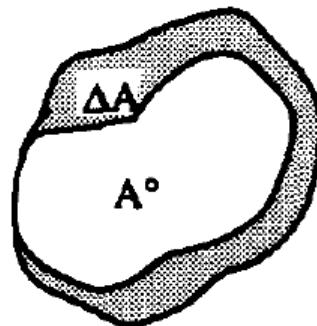
(Bejaoui, Thèse, 2009)



Objets incertains

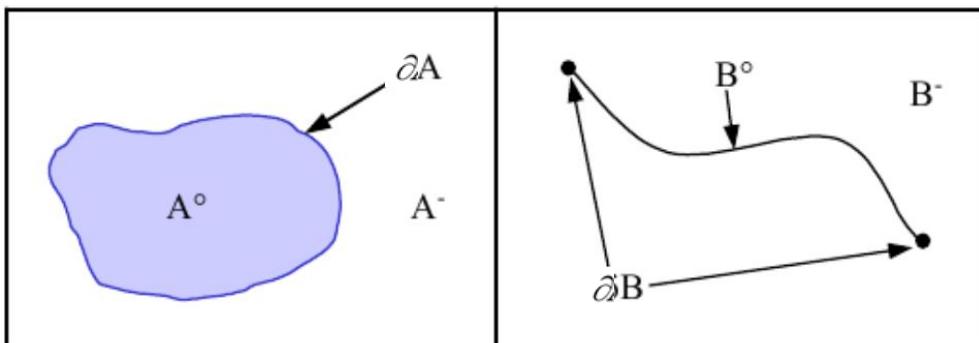
(Clementini et al.,
IJAR, 1997)

Objets incertains: les frontières larges



Objets incertains

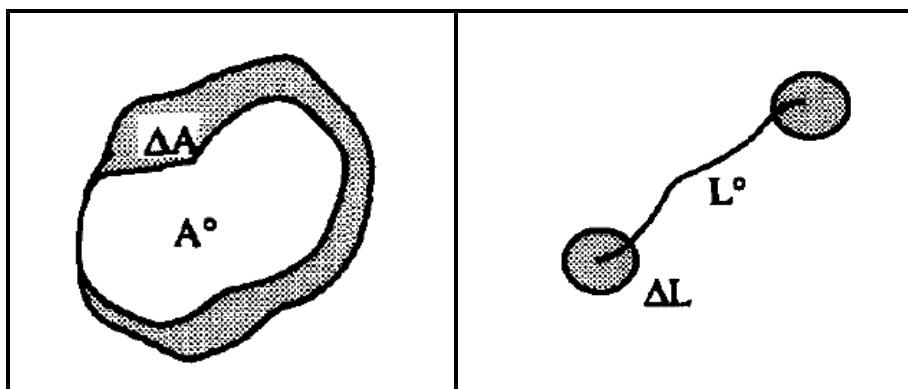
9IM avec les frontières certaines :



$$M = \begin{pmatrix} A^\circ \cap B^\circ & A^\circ \cap \partial B & A^\circ \cap B^- \\ \partial A \cap B^\circ & \partial A \cap \partial B & \partial A \cap B^- \\ A^- \cap B^\circ & A^- \cap \partial B & A^- \cap B^- \end{pmatrix}$$

(Clementini et al., IJAR, 1997)

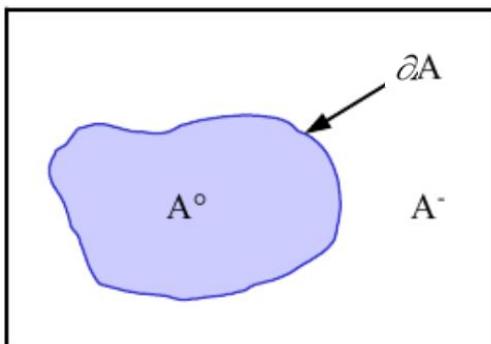
9IM avec les frontières larges :



$$M = \begin{pmatrix} A^\circ \cap B^\circ & A^\circ \cap \Delta B & A^\circ \cap B^- \\ \Delta A \cap B^\circ & \Delta A \cap \Delta B & \Delta A \cap B^- \\ A^- \cap B^\circ & A^- \cap \Delta B & A^- \cap B^- \end{pmatrix}$$

Objets incertains

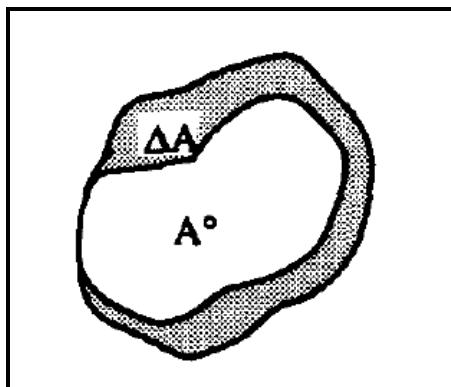
9IM avec les frontières certaines :



$$M = \begin{pmatrix} A^\circ \cap B^\circ & A^\circ \cap \partial B & A^\circ \cap B^- \\ \partial A \cap B^\circ & \partial A \cap \partial B & \partial A \cap B^- \\ A^- \cap B^\circ & A^- \cap \partial B & A^- \cap B^- \end{pmatrix}$$

8 relations entre 2 régions simples
certaines

9IM avec les frontières larges :



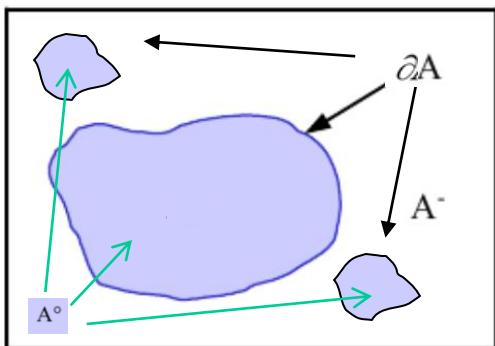
(Clementini & Di
Felice, 2001)

$$M = \begin{pmatrix} A^\circ \cap B^\circ & A^\circ \cap \Delta B & A^\circ \cap B^- \\ \Delta A \cap B^\circ & \Delta A \cap \Delta B & \Delta A \cap B^- \\ A^- \cap B^\circ & A^- \cap \Delta B & A^- \cap B^- \end{pmatrix}$$

44 relations entre 2 régions
simples incertaines

Objets incertains

9IM avec les frontières certaines :

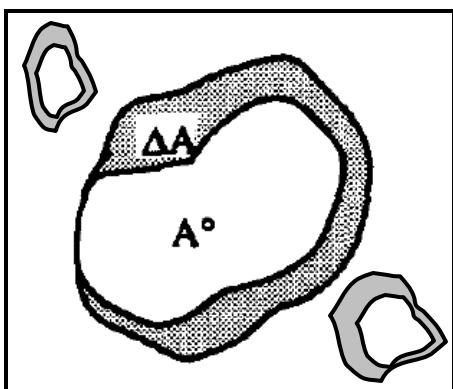


(Duboisset, Thèse,
2007)

$$M = \begin{pmatrix} A^\circ \cap B^\circ & A^\circ \cap \partial B & A^\circ \cap B^- \\ \partial A \cap B^\circ & \partial A \cap \partial B & \partial A \cap B^- \\ A^- \cap B^\circ & A^- \cap \partial B & A^- \cap B^- \end{pmatrix}$$

16 relations entre 2 régions
composites certaines

9IM avec les frontières larges :



$$M = \begin{pmatrix} A^\circ \cap B^\circ & A^\circ \cap \Delta B & A^\circ \cap B^- \\ \Delta A \cap B^\circ & \Delta A \cap \Delta B & \Delta A \cap B^- \\ A^- \cap B^\circ & A^- \cap \Delta B & A^- \cap B^- \end{pmatrix}$$

56 relations entre 2 régions
composites incertaines

Objets incertains

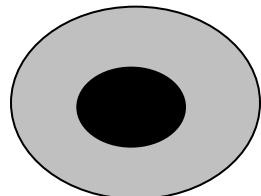
Regroupement des matrices

- *coversWithBoundary* (cases 7, 8, 12, 13): $\begin{pmatrix} 0 & \delta & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & \delta & 1 \end{pmatrix}$;
- *boundaryOverlap* (cases 14, 15, 16, 17): $\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & \delta \\ 0 & \delta & 1 \end{pmatrix}$;
- *stronglyOverlap* (cases 23, 24, 25, 26): $\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & \delta \\ 0 & \delta & 1 \end{pmatrix}$;
- *equal* (case 41) and *nearlyEqual* (cases 42, 43, 44): $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \delta \\ 0 & \delta & 1 \end{pmatrix}$;
- *coveredBy* (case 27) and *nearlyCoveredBy* (cases 19, 20, 28): $\begin{pmatrix} 1 & \delta & 0 \\ 1 & 1 & \delta \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$;
- *nearlyFill* (cases 29, 30, 31, 32): $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & \delta \\ 0 & \delta & 1 \end{pmatrix}$;
- *inside* (case 39);
- *covers* (case 33) and *nearlyCovers* (cases 21, 22, 34): $\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \delta & 1 & 1 \\ 0 & \delta & 1 \end{pmatrix}$;
- *nearlyFilledBy* (cases 35, 36, 37, 38): $\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & \delta \\ 0 & \delta & 1 \end{pmatrix}$;
- *contains* (case 40).

(Bejaoui et al., IJGIS, 2009,
Geoinformatica 2010, ER 2008;
Thèse 2009)

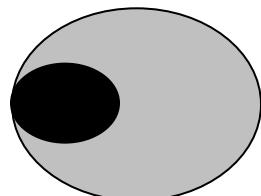
Nouvelle approche plus facilement implémentable dans un SGBD

$A =$



<min(A), inside,
max(A)>

$A =$

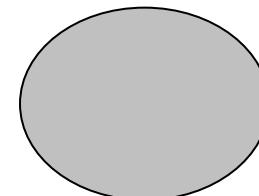


<min(A),
coveredby,
max(A)>

min(A)

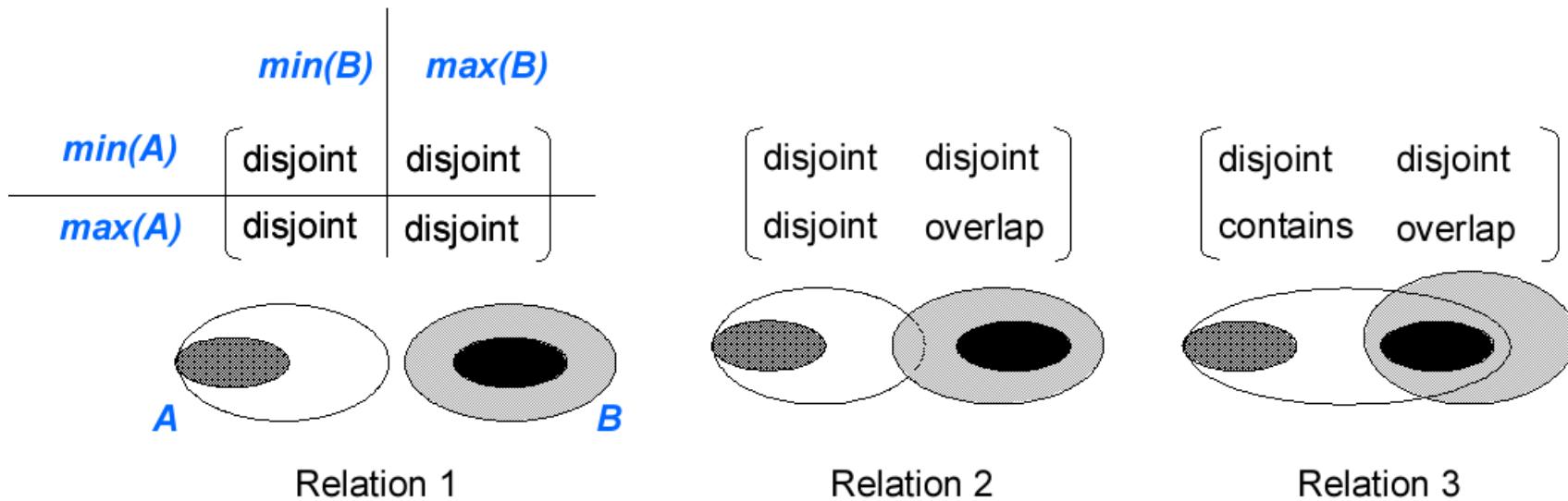


max(A)



Représentation des objets et leurs relations topologiques

Nouvelle approche plus facilement implémentable dans un SGBD



Plus facilement implantable car :

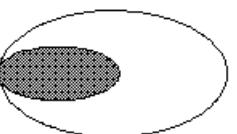
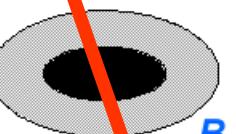
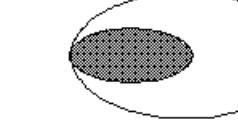
- $\min(A)$, $\max(B)$, $\min(B)$, $\max(B)$ sont des régions simples
- la matrice n'indique que des relations entre régions simples

ET

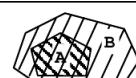
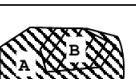
Représentation des objets et leurs relations topologiques

Nouvelle approche plus facilement implémentable dans un SGBD

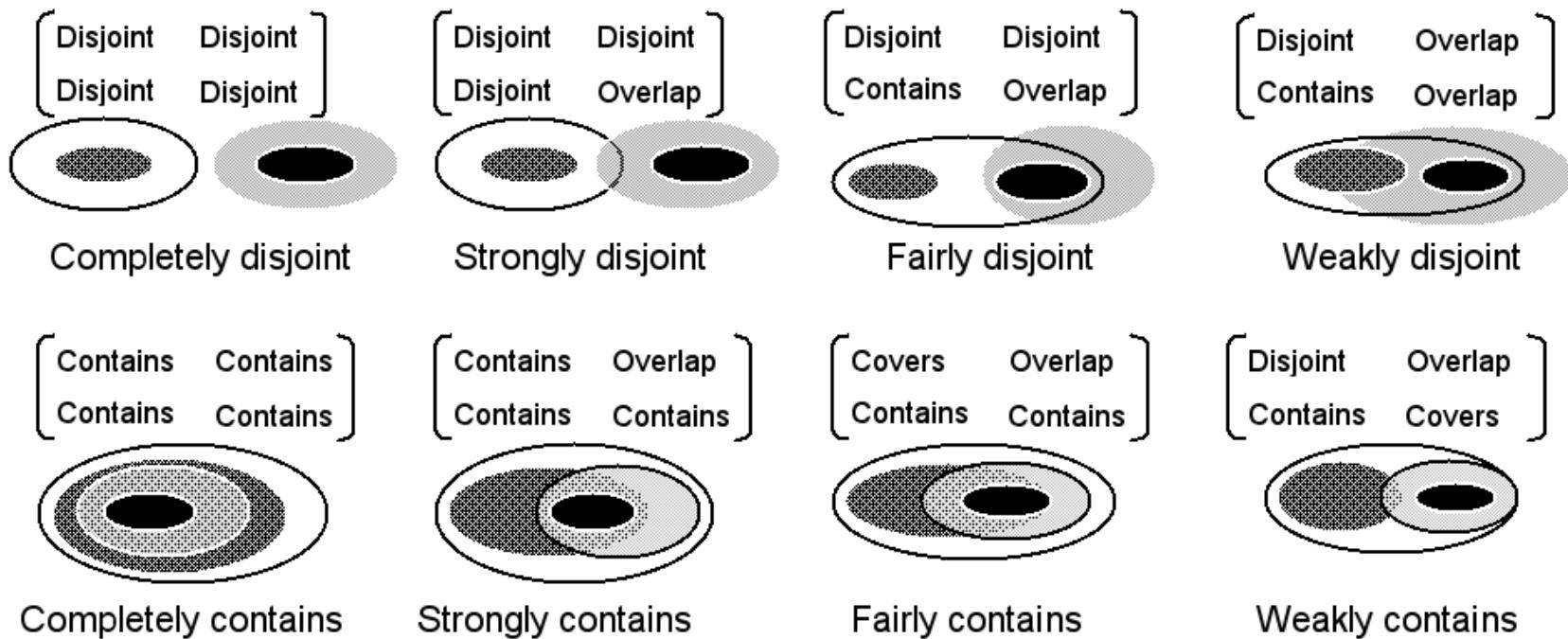
	$\min(B)$	$\max(B)$
$\min(A)$	disjoint	disjoint
$\max(A)$	disjoint	disjoint

Relation 1 Relation 2 Relation 3

			
$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ $\langle A, \text{disjoint}, B \rangle$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ $\langle A, \text{contains}, B \rangle$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ $\langle A, \text{inside}, B \rangle$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ $\langle A, \text{equal}, B \rangle$
			
$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ $\langle A, \text{meet}, B \rangle$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ $\langle A, \text{covers}, B \rangle$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ $\langle A, \text{coveredBy}, B \rangle$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ $\langle A, \text{overlap}, B \rangle$

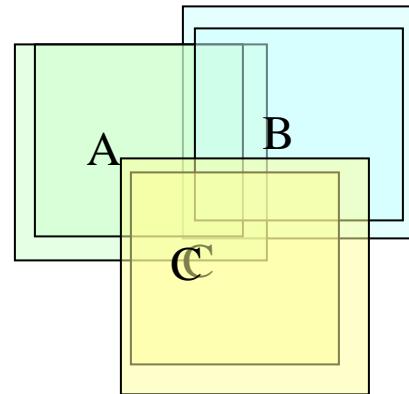
Représentation des objets et leurs relations topologiques



Regroupement des relations

Objets incertains

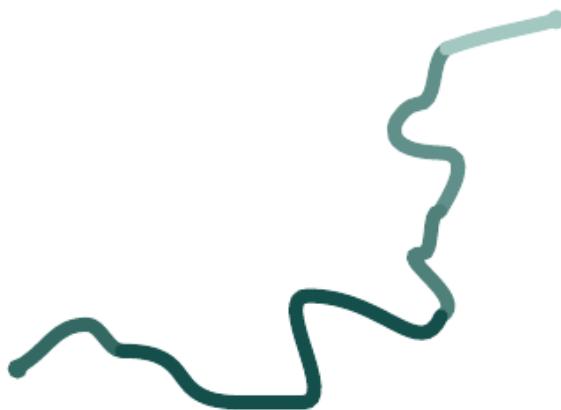
Et l'incertitude dans les cas plus compliqués ?
DE-9IM, relations ternaires, etc.



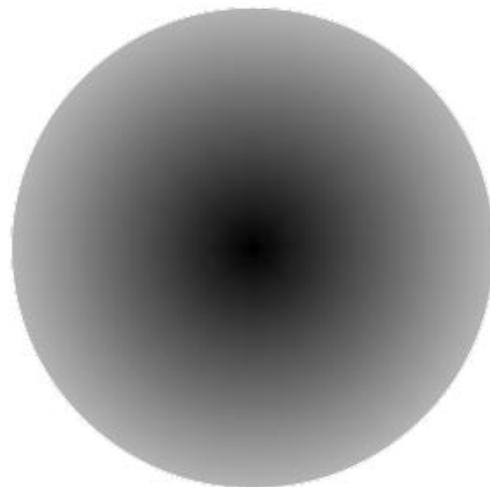
Objets incertains

(Dilo, Thèse, 2006)

(Schneider, STDB 2004)



Une ligne incertaine

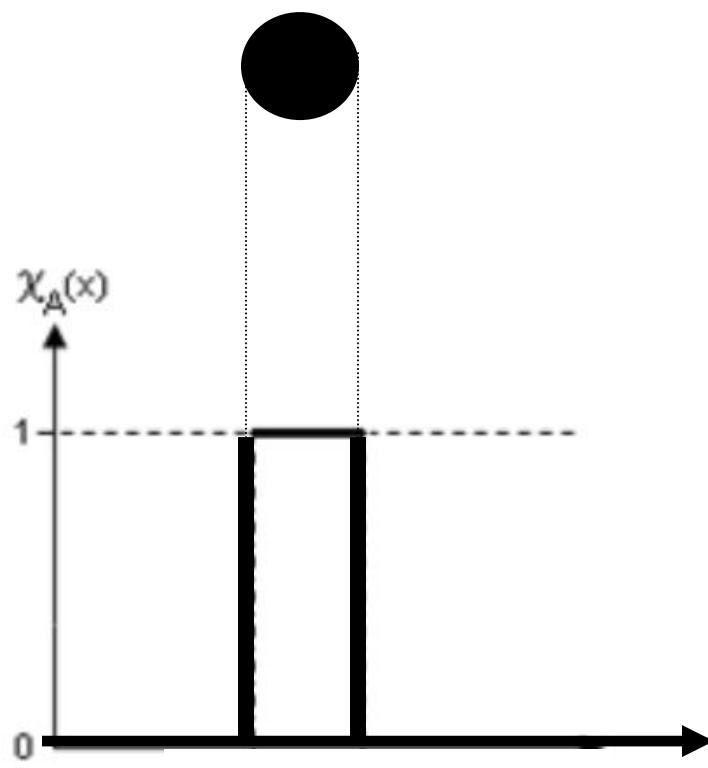


Une région incertaine

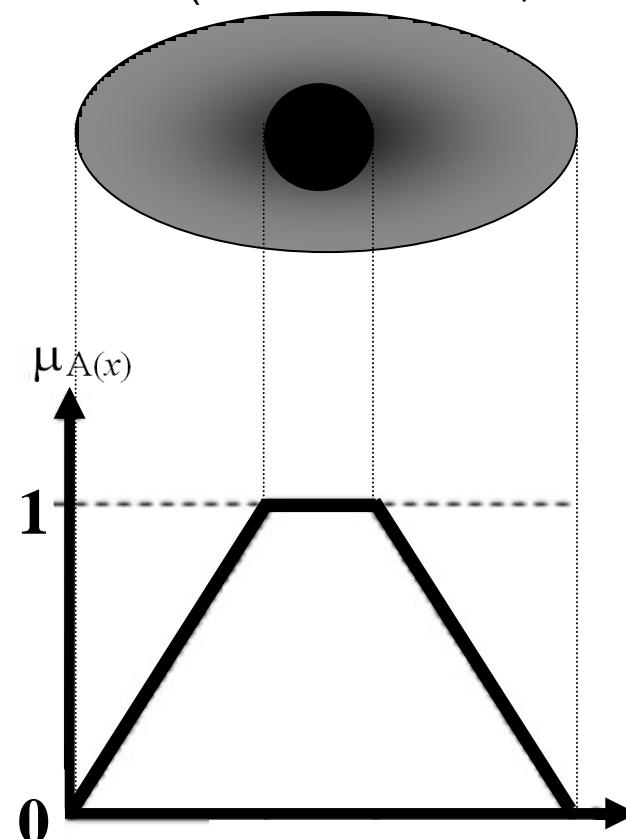
Objets incertains

Objets incertains: l'approche floue

(Dilo, Thèse, 2006)
(Schneider, STDB 2004)
(Bejaoui, Thèse, 2009)
(Carette Valérie, 2008)



Ensemble classique

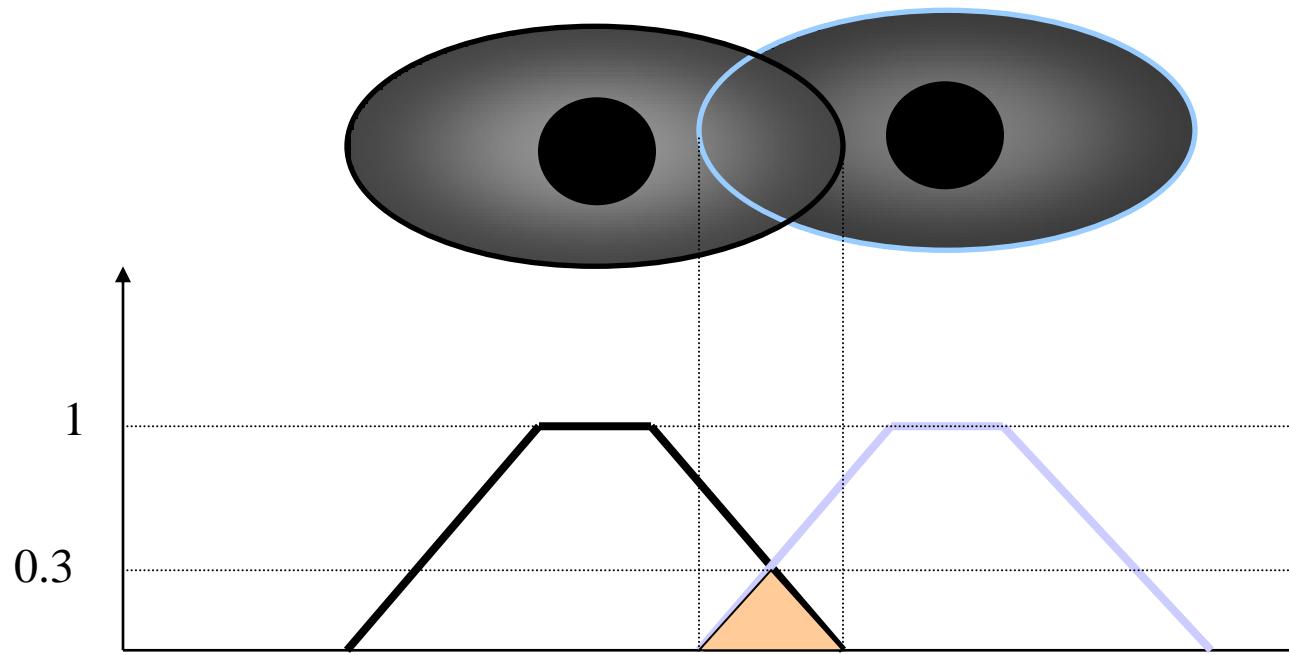


Ensemble flou

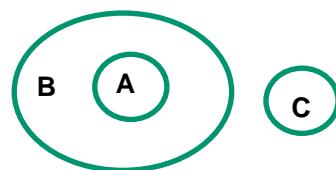
Objets incertains

Relation topologique sur les objets spatiaux flous

$$\text{Disjoint}(\mu, \nu) = 1 - \sup_{p \in \mathbb{R}^2} \{(\mu \sqcap \nu)(p)\}$$



$$\text{Disjoint}(\mu, \nu) = 1 - 0.3 = 0.7$$



Le polygone A est dans le polygone B. Le polygone B est disjoint du polygone C. Quel est la relation topologique entre A et C ?



Donnons une réponse claire et rigoureuse.

Données :

- Le polygone **A** est **dans** le polygone **B** → donc **A ⊂ B** (A est entièrement contenu dans B).
- Le polygone **B** est **disjoint** du polygone **C** → donc **B ∩ C = Ø** (ils n'ont aucun point en commun).

Déduction :

Puisque A est inclus dans B, et que B est **disjoint** de C, alors **A**, étant entièrement à l'intérieur de B, **ne peut pas avoir de point en commun avec C**.

Conclusion :

La relation topologique entre **A** et **C** est également **disjoints**.

Formulation :

A est disjoint de C, c'est-à-dire :

$$A \cap C = \emptyset.$$

Souhaites-tu une illustration ou une représentation mathématique plus formelle (par exemple avec les matrices 9-intersections) ?

Relations topologiques et ChatGPT

Dans une matrice 9-IM, est-ce que les intersections suivantes sont valides, si O et P sont deux polygones sans trou. $\text{Int}(O) \cap \text{Int}(P) \neq \emptyset$; $\text{Int}(O) \cap \text{Bd}(P) = \emptyset$; $\text{Int}(O) \cap \text{Ext}(P) \neq \emptyset$; $\text{Bd}(O) \cap \text{Int}(P) = \emptyset$; $\text{Bd}(O) \cap \text{Bd}(P) \neq \emptyset$; $\text{Bd}(O) \cap \text{Ext}(P) \neq \emptyset$; $\text{Ext}(O) \cap \text{Int}(P) \neq \emptyset$; $\text{Ext}(O) \cap \text{Bd}(P) \neq \emptyset$; $\text{Ext}(O) \cap \text{Ext}(P) \neq \emptyset$

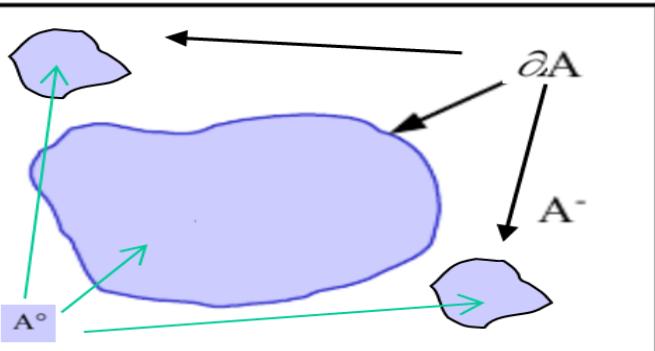


Conclusion

Non, la configuration des intersections que tu proposes **n'est pas topologiquement valide** pour deux **polygones sans trou**.

Elle enfreint la cohérence spatiale des polygones dans le modèle 9-IM :

Si les **intérieurs se chevauchent**, il est pratiquement **impossible** que leurs frontières **n'intersectent pas** l'intérieur de l'autre (sauf dans des cas très particuliers qui ne s'appliquent pas ici, car les objets sont supposés être **fermés et sans trou**).



U et T sont deux ensembles de polygones sans trou. Est-il possible d'utiliser les matrices 9-IM pour représenter les relations topologiques entre ces deux ensembles ?

Très bonne question — et elle touche à une **limite importante** du modèle des **9-intersections (9-IM)**.

? Problème posé :

Tu demandes si on peut utiliser les matrices **9-IM**, conçues pour deux **objets géométriques simples**, pour exprimer des relations **entre deux ensembles de polygones sans trou** (donc :

- **U** = ensemble de polygones $\{u_1, u_2, \dots, u_m\}$
- **T** = ensemble de polygones $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$.

* Réponse courte :

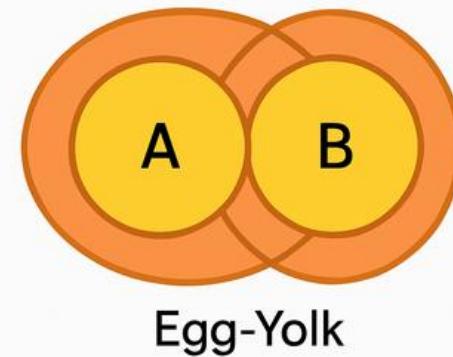
Non, les matrices 9-IM ne s'appliquent pas directement à des ensembles d'objets multiples.

Elles sont conçues pour deux entités géométriques simples à la fois (lignes, points, polygones...).



Peut-on adapter les matrices 9-IM aux objets à frontières larges ?

- Propose différents modèles (dont le modèle à frontières larges)
- Dessine une matrice d'un exemple qu'il propose



Mais dessine n'importe quoi quand on lui demande de dessiner une matrice que l'on choisit !

est-il possible d'adapter le modèle 9IM, à 3 polygones, c'est-à-dire qu'une matrice représentera une relation topologique entre 3 polygones ?

♦ 2. Ce qu'on peut faire :

a) Décomposer en relations binaires

- Appliquer 9-IM à chaque paire :
 - $9\text{-IM}(A, B)$
 - $9\text{-IM}(A, C)$
 - $9\text{-IM}(B, C)$
- Tu obtiens **trois matrices**, qui ensemble décrivent la configuration topologique globale.

⚠ Limite : tu ne captures **pas les interactions conjointes** (comme "A chevauche l'intersection de B et C").

b) Étendre vers un modèle n-aire

- Quelques travaux de recherche proposent de généraliser 9-IM en "**hypercube d'intersections**" ou en "**tensorisation**" :
 - On évalue les **intersections multiples** :
 $\text{Int}(A) \cap \text{Int}(B) \cap \text{Bd}(C)$, etc.
 - Cela mène à une structure **27-IM** pour 3 objets ($3 \times 3 \times 3$).