

Modélisation et simulation de terrains virtuels

Axel Paris

Encadré par Éric Galin & Éric Guérin

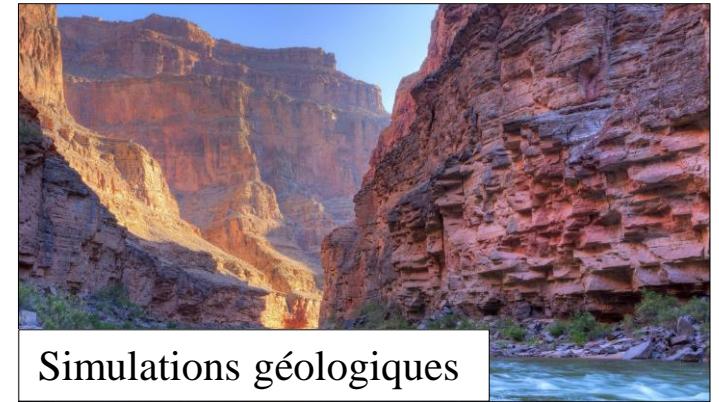
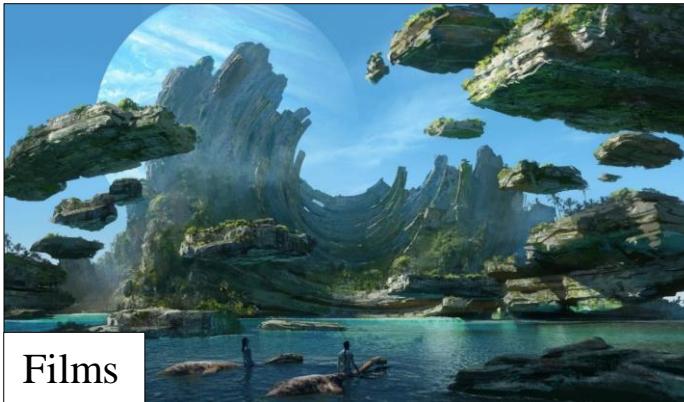


Mardi 21 mars 2023



Contexte

Les terrains sont des objets utilisés dans de **nombreux domaines**



Points clés

Réalisme

Etendue

Variété

Contrôle



Erosion par
l'eau de pluie

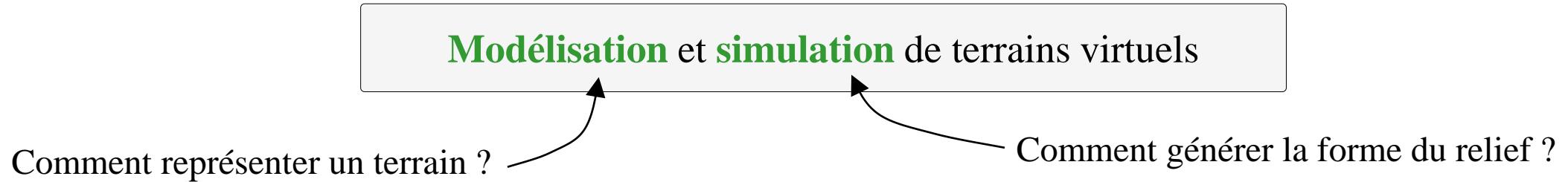
Influence de
la végétation

Stratification

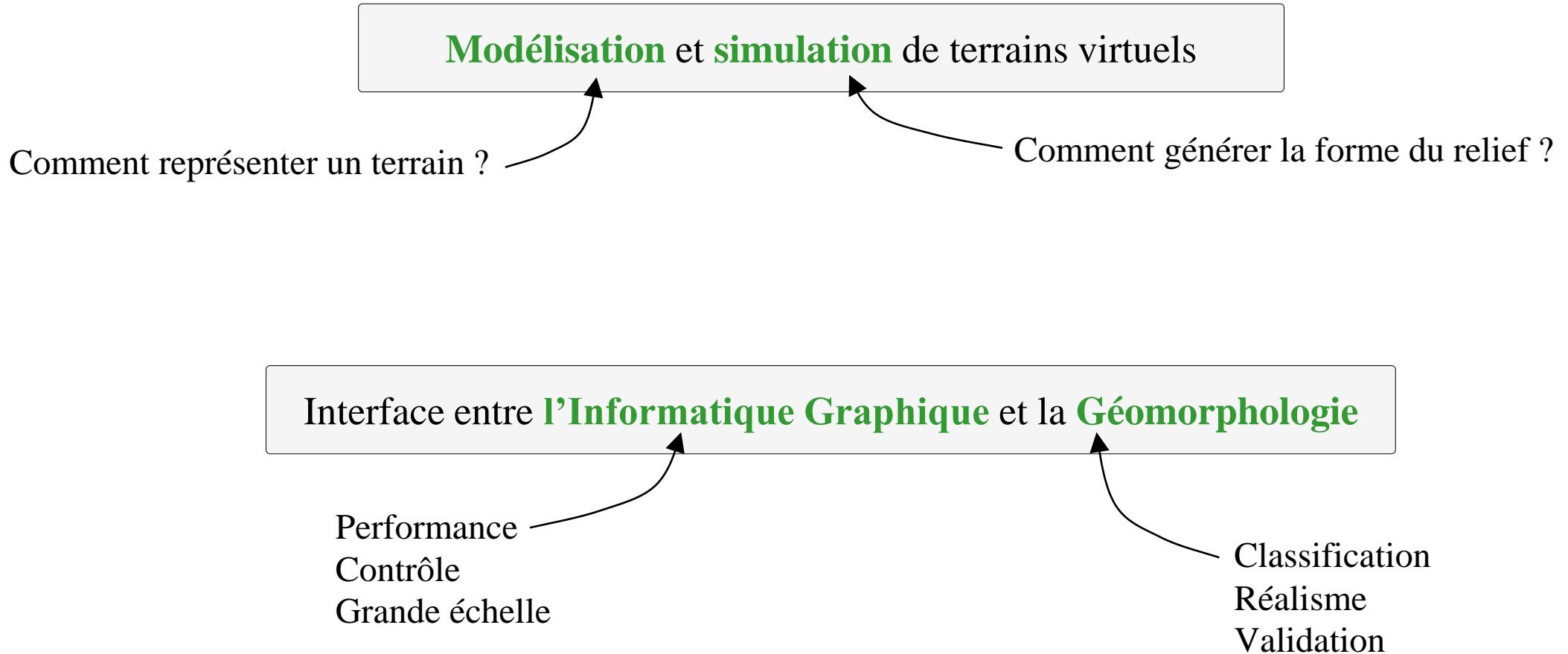
Transport de sédiments

Déposition

Notre approche



Notre approche



Classification des méthodes de génération de terrains



Classification des méthodes

On classe généralement les méthodes de génération de terrains en trois catégories

Génération
procédurale

Synthèse par
l'exemple

Simulations
physiques

Classification
« technique »
d'Informatique
Graphique



Classification des méthodes

Classification
« technique »
d'Informatique
Graphique

On classe généralement les méthodes de génération de terrains en trois catégories

Génération
procédurale

Synthèse par
l'exemple

Simulations
physiques

Notre approche
basse
Géomorphologie

Nous proposons une nouvelle classification inspirée de la **Géomorphologie**
basée sur **l'échelle spatiale et temporelle** des formes de terrain

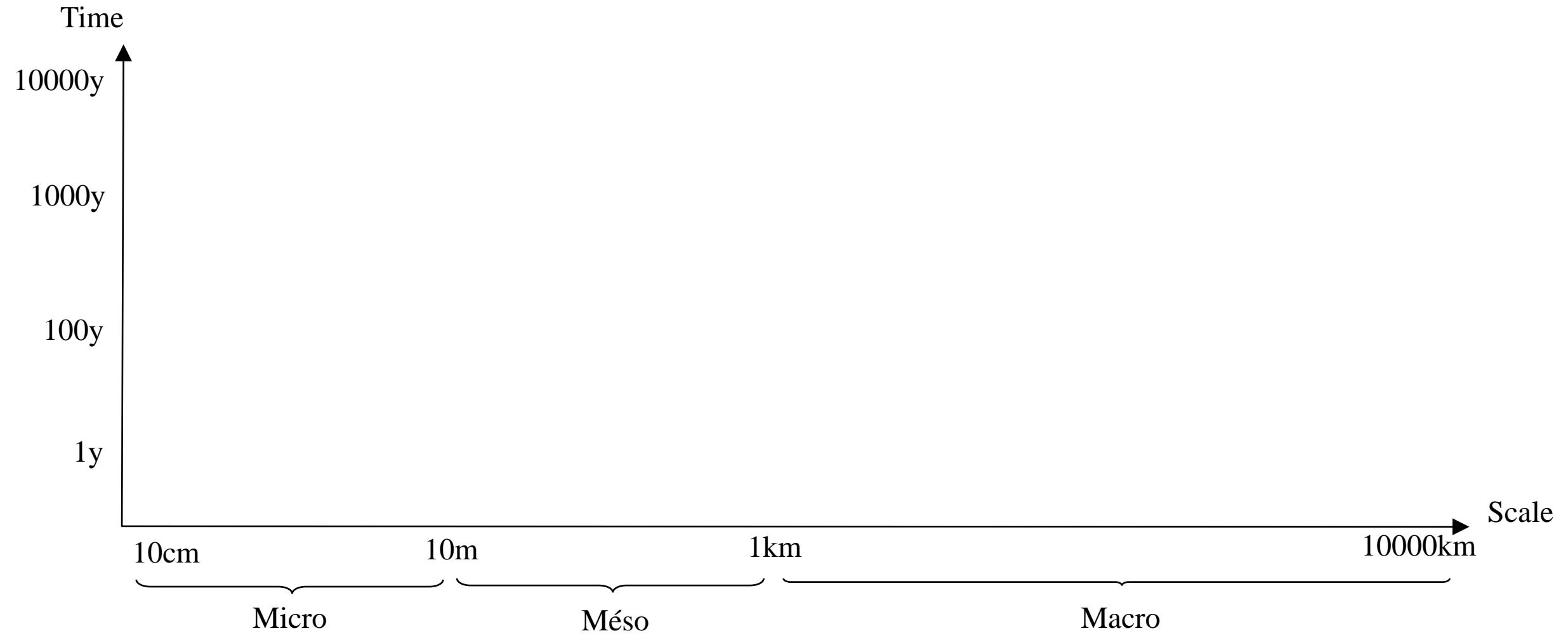
Micro

Méso

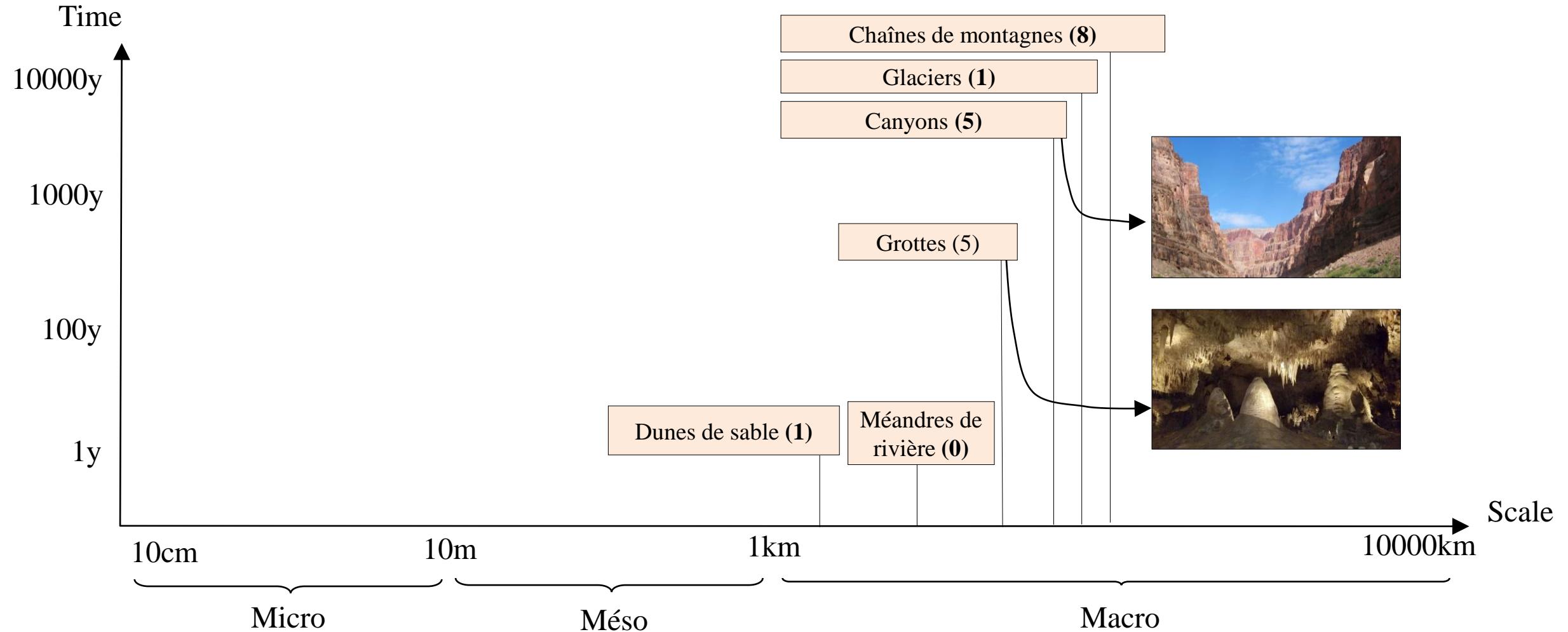
Macro



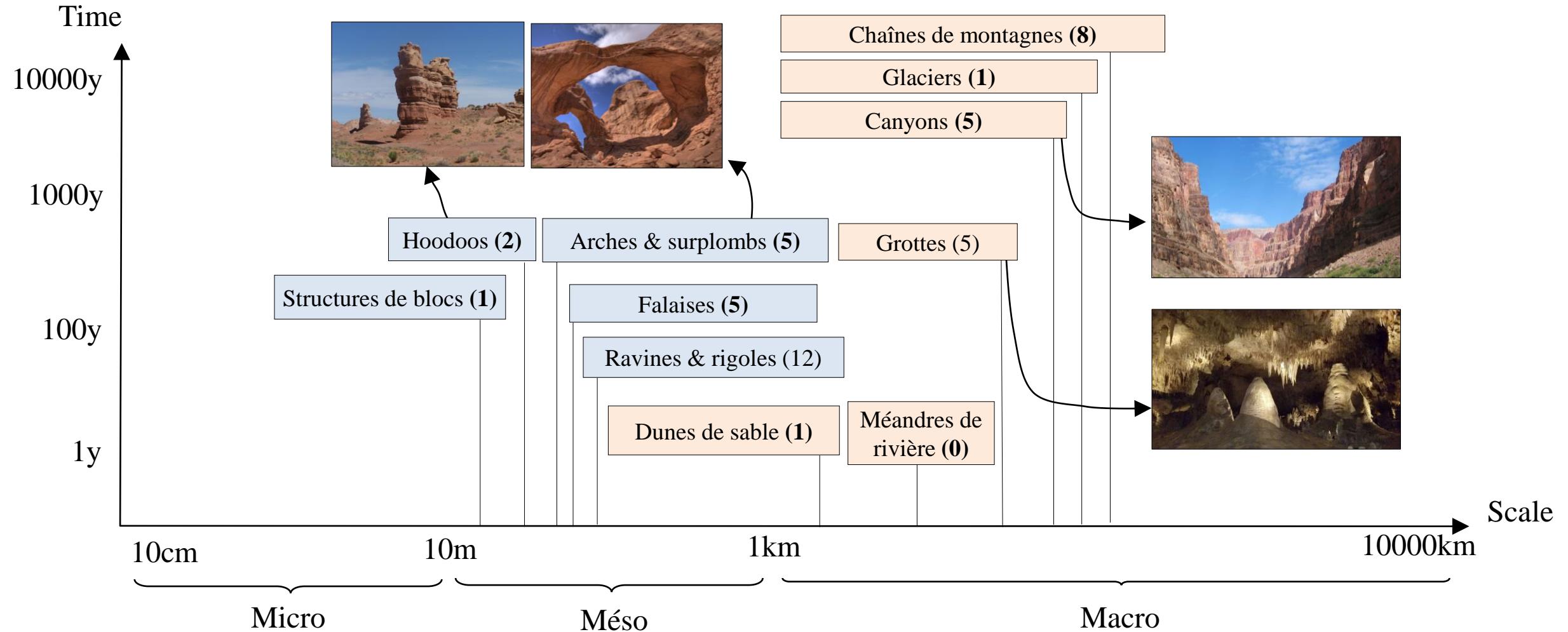
Classification des méthodes



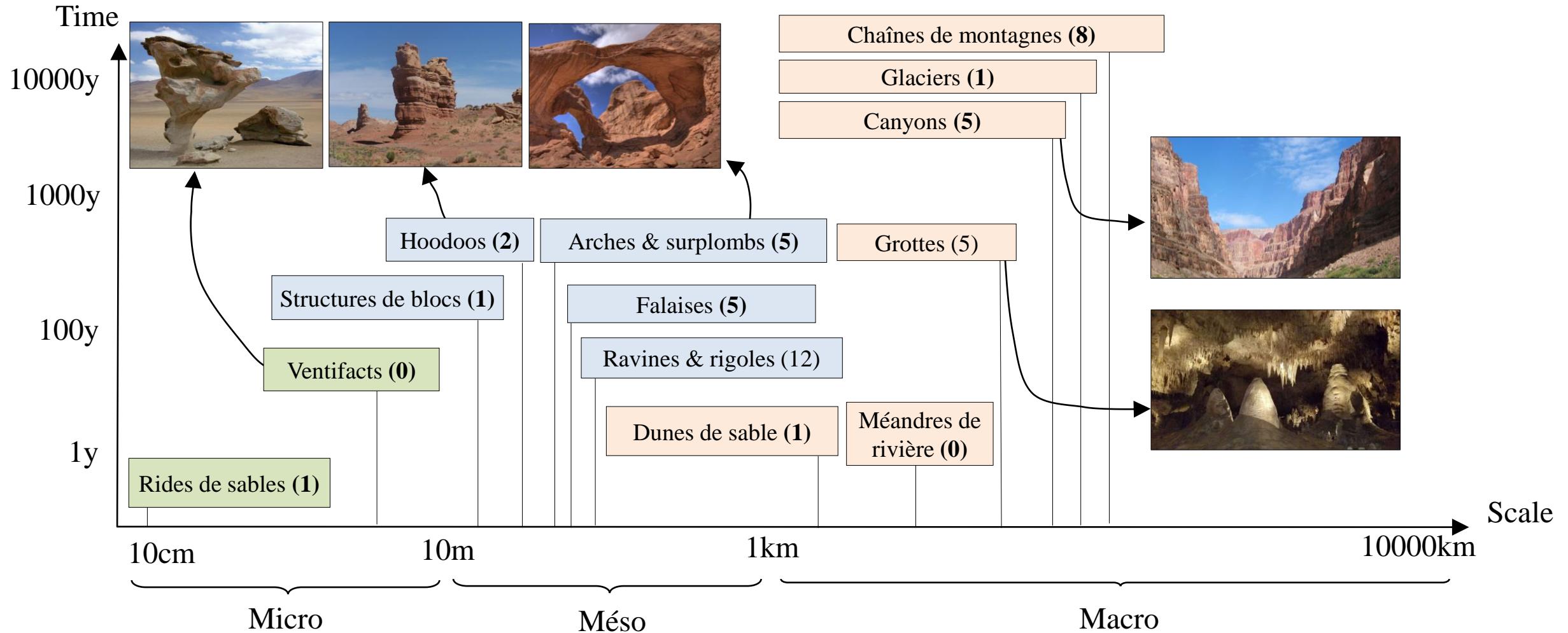
Classification des méthodes



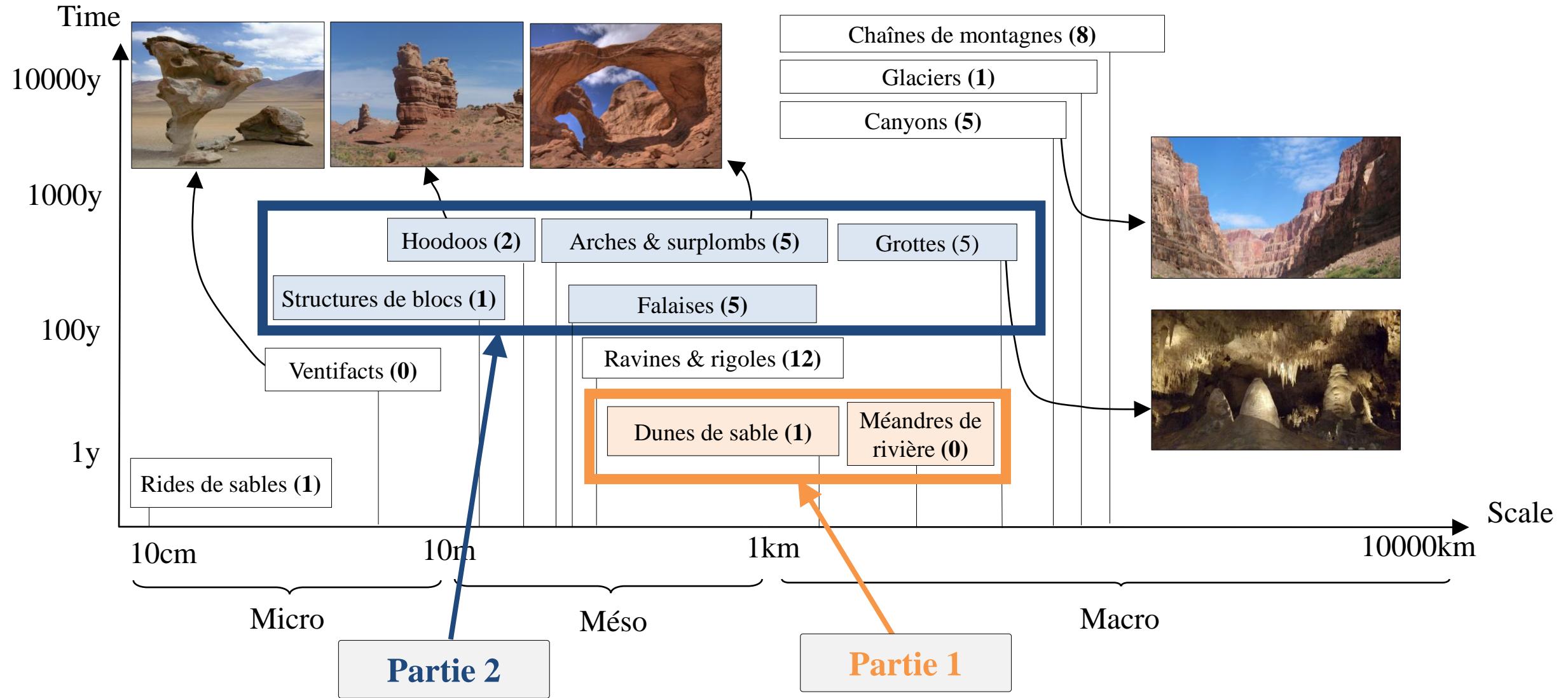
Classification des méthodes



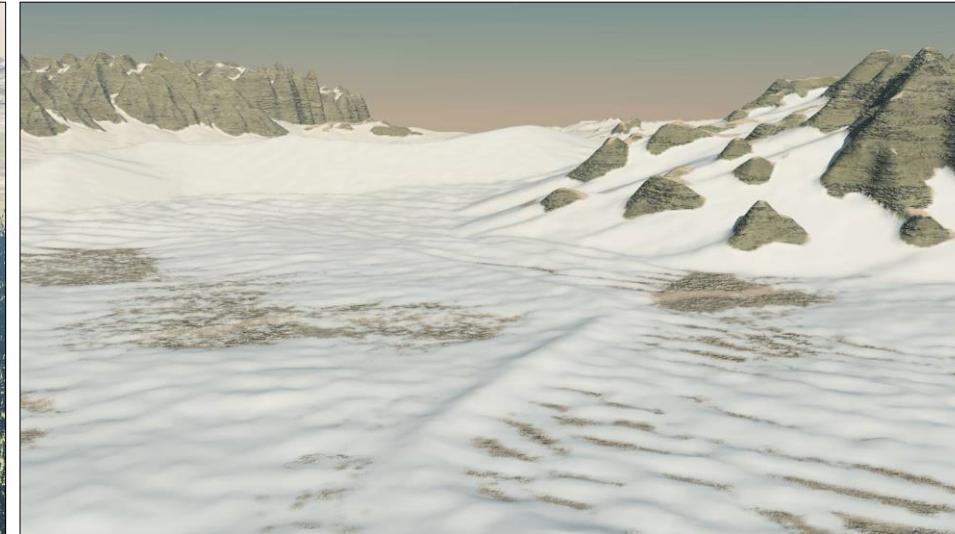
Classification des méthodes



Classification des méthodes

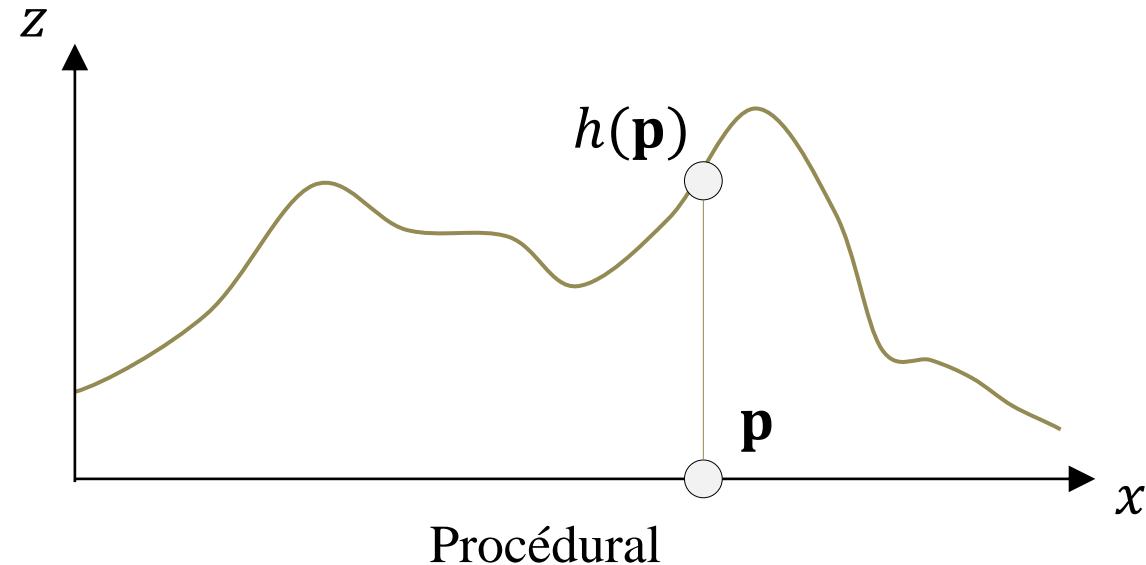


Simulation de terrains à l'échelle macro



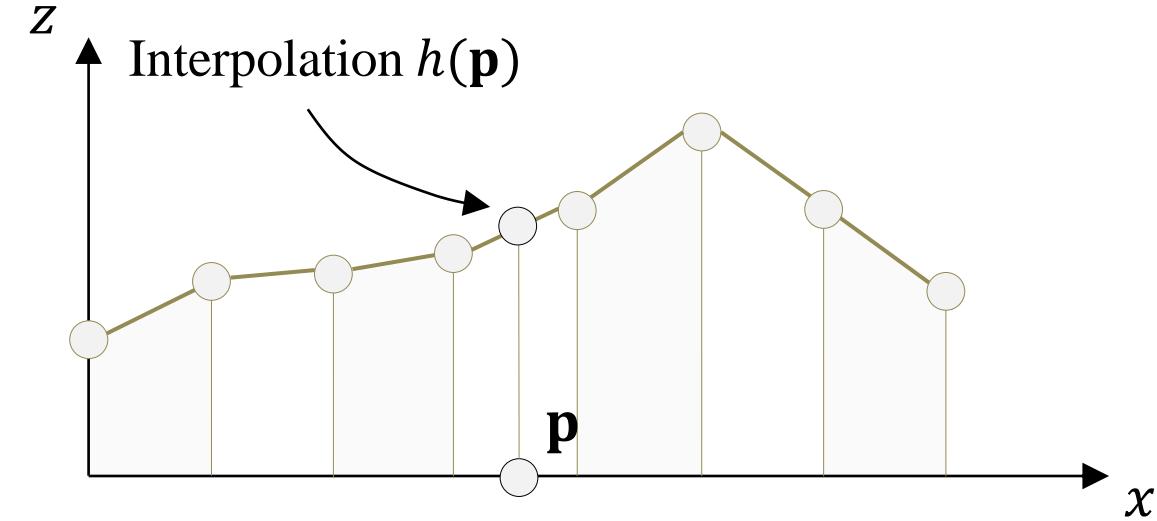
État de l'art : terrains à grande échelle

Surface du terrain par un modèle d'élévation $h : \mathbf{R}^2 \rightarrow \mathbf{R}$
L'élévation z est calculée par $z = h(\mathbf{p}_{xy})$



Procédural

Compact en mémoire
Précision **infinie**
Simulation impossible



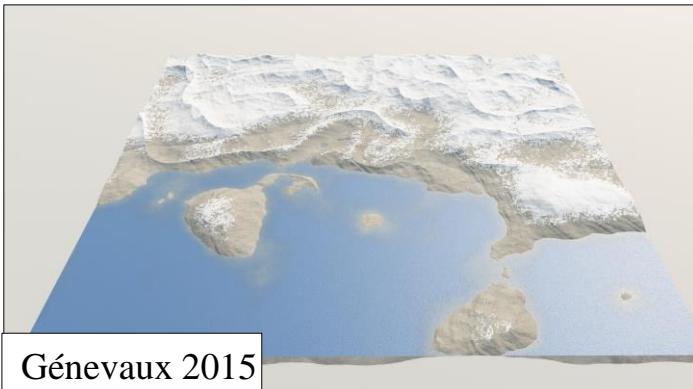
Discret

Réalisme des données
Evolution temporelle
Coût mémoire

État de l'art : terrains à grande échelle

Modèles d'élévation : très adaptés aux terrains **à grandes échelles**
Utilisé dans la **majorité** des cas d'application
Compatible avec les **techniques d'érosion**

Procédural



$\text{Fonction } z = f(\mathbf{p}_{xy})$

Synthèse par l'exemple



$\text{Discret } z = h(i, j)$

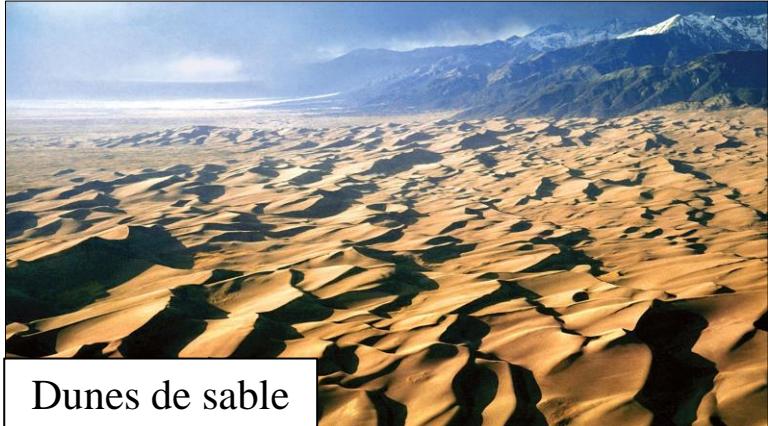
Simulation



$\text{Discret } z = h(i, j)$

État de l'art : terrains à grande échelle

Techniques existantes : génération de reliefs montagneux alpins, et érosion hydraulique
Pas de solution pour les reliefs en plaine...



Dunes de sable



Méandres de rivière



Rivières en tresse

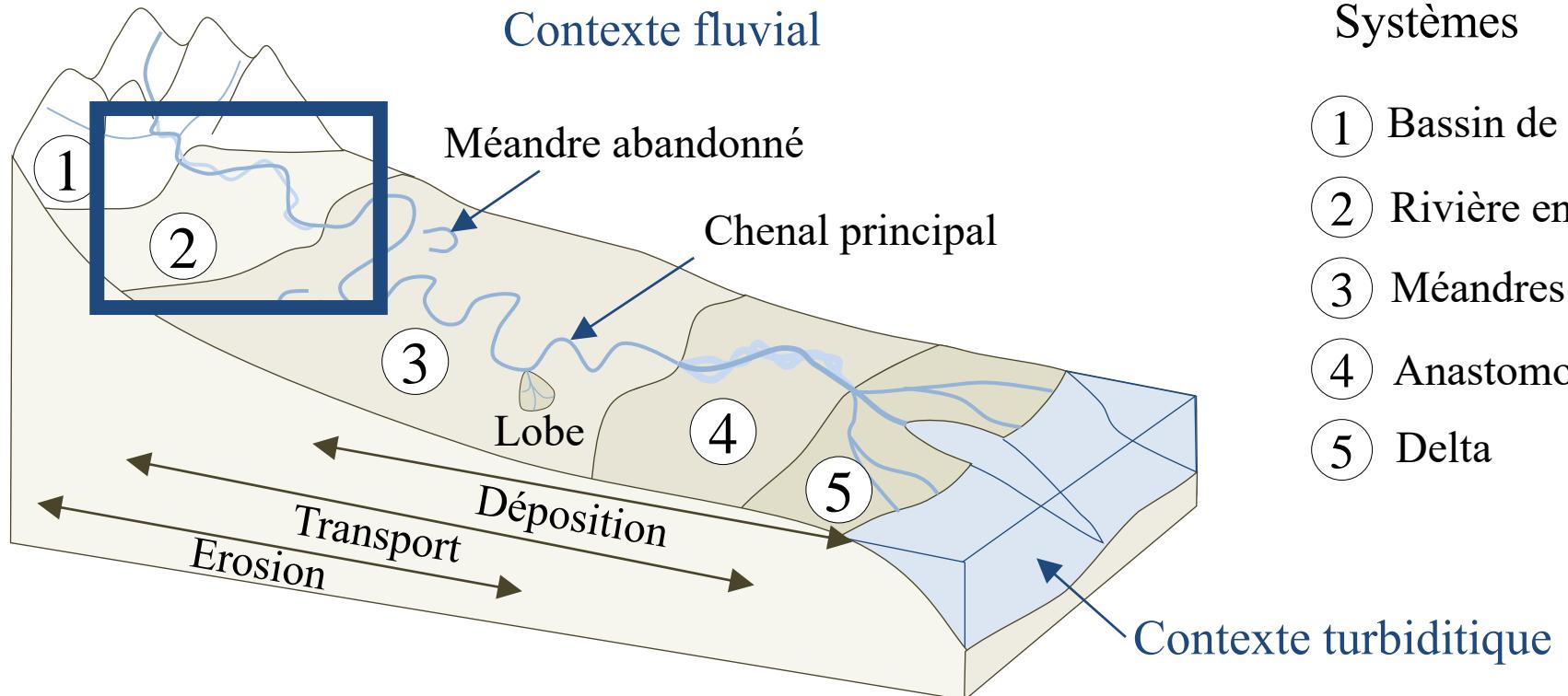
Comment générer plus de variété ?

Simulation de trajectoires de méandres



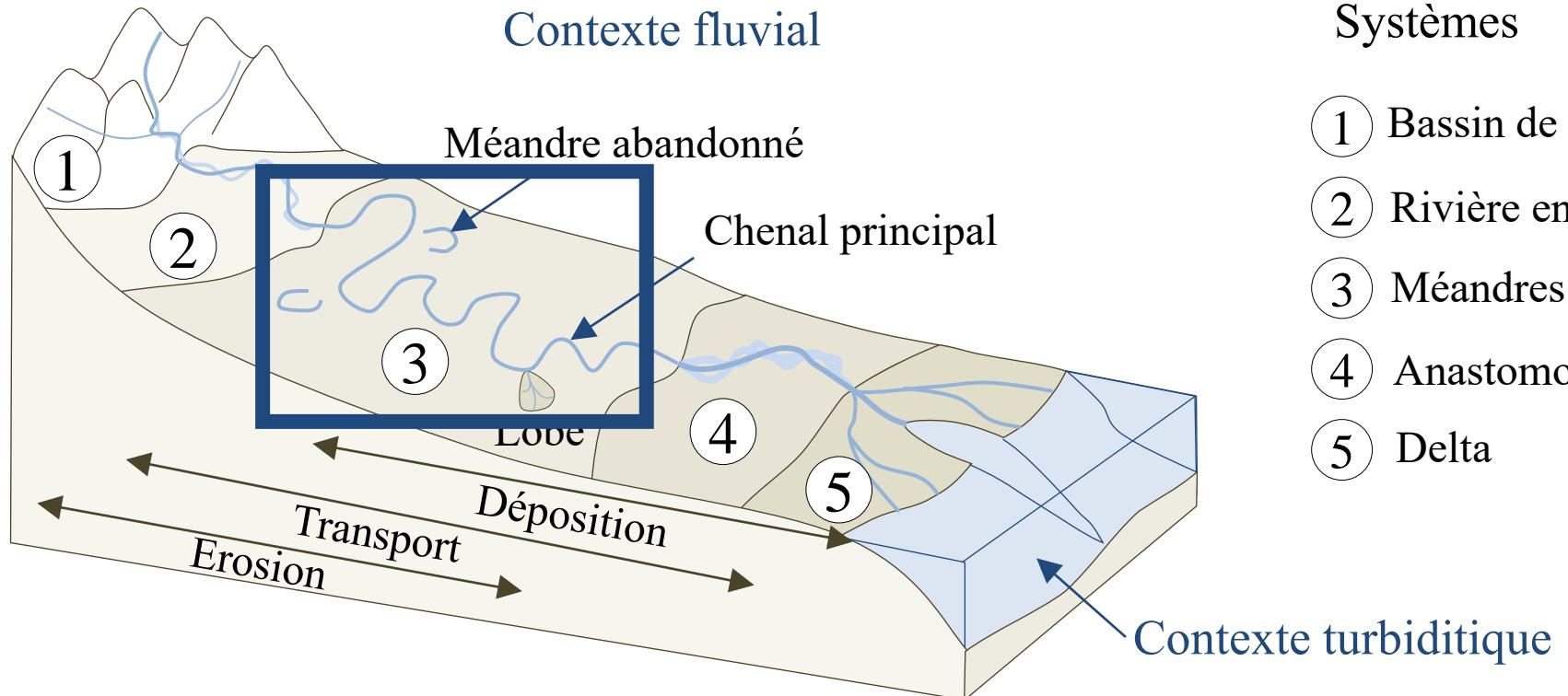
Les rivières en géomorphologie

Une rivière peut prendre **plusieurs formes**



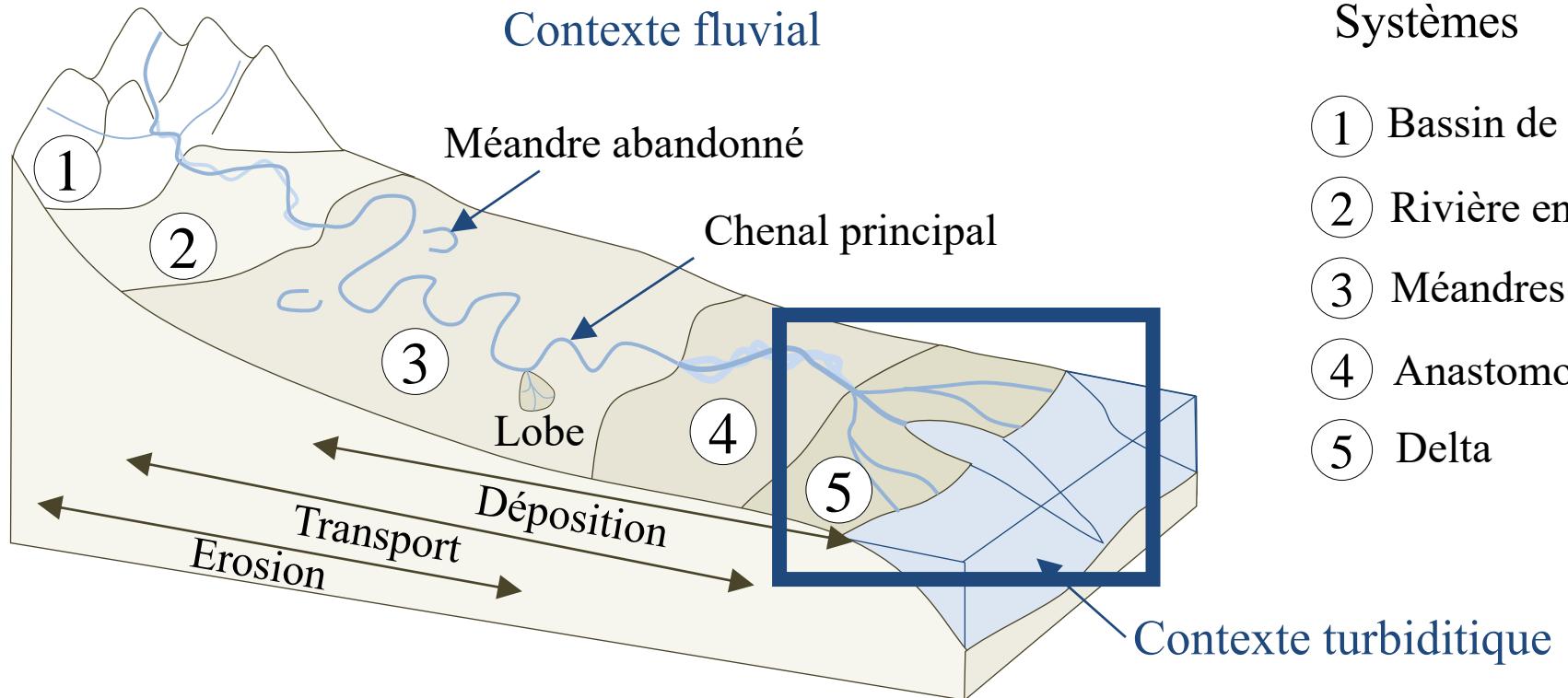
Les rivières en géomorphologie

Une rivière peut prendre **plusieurs formes**



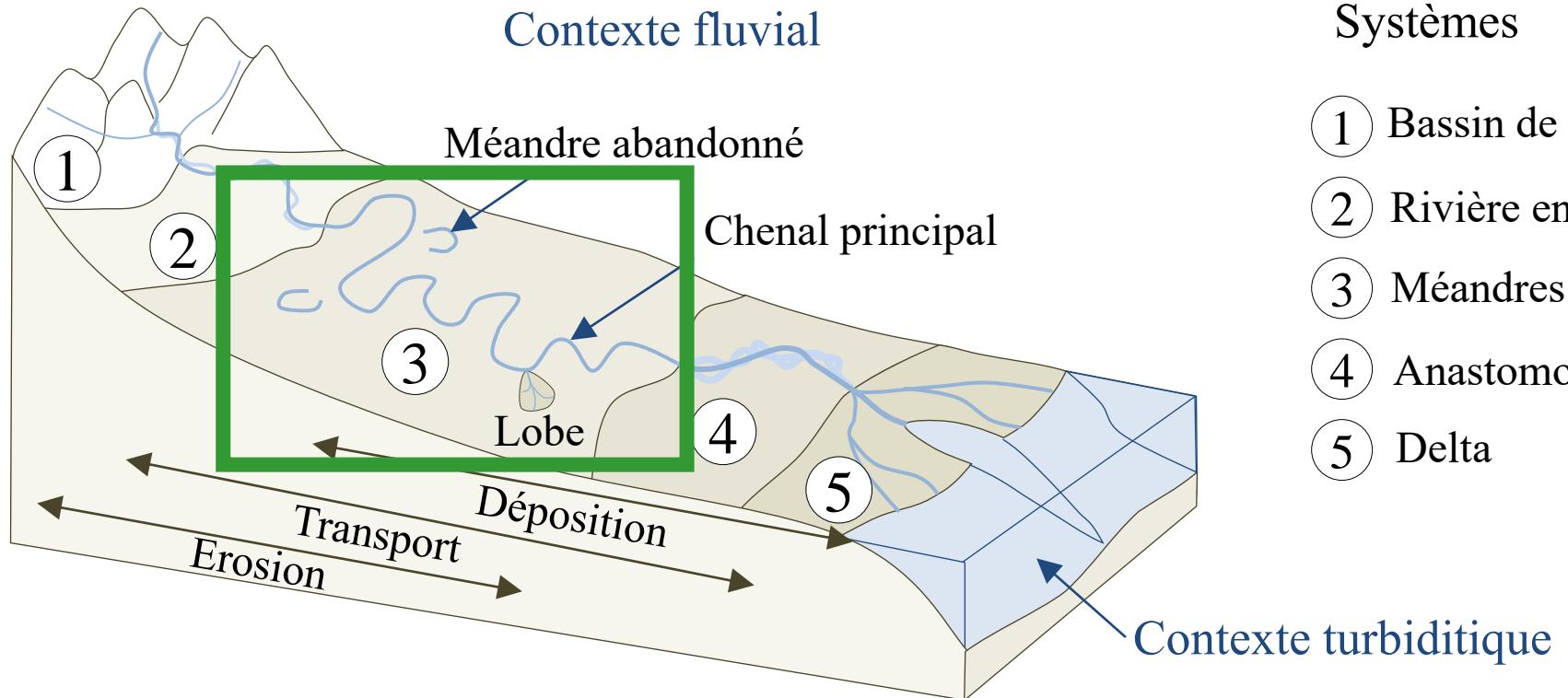
Les rivières en géomorphologie

Une rivière peut prendre **plusieurs formes**



Les rivières en géomorphologie

Une rivière peut prendre **plusieurs formes**



Systèmes

- ① Bassin de drainage
- ② Rivière en tresses
- ③ Méandres
- ④ Anastomotique
- ⑤ Delta

Les rivières en géomorphologie

Les méandres de rivière apparaissent **en plaines**

Déposition
(partie interne)

Vitesse du flux maximale

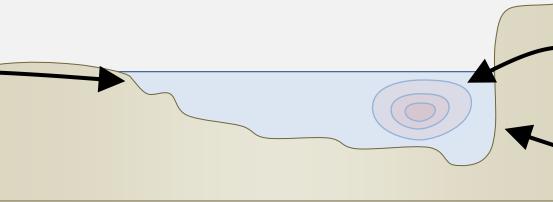
Erosion
(partie externe)



Les rivières en géomorphologie

Les méandres de rivière apparaissent **en plaines**

Déposition
(partie interne)



Erosion
(partie externe)



Méandre simple



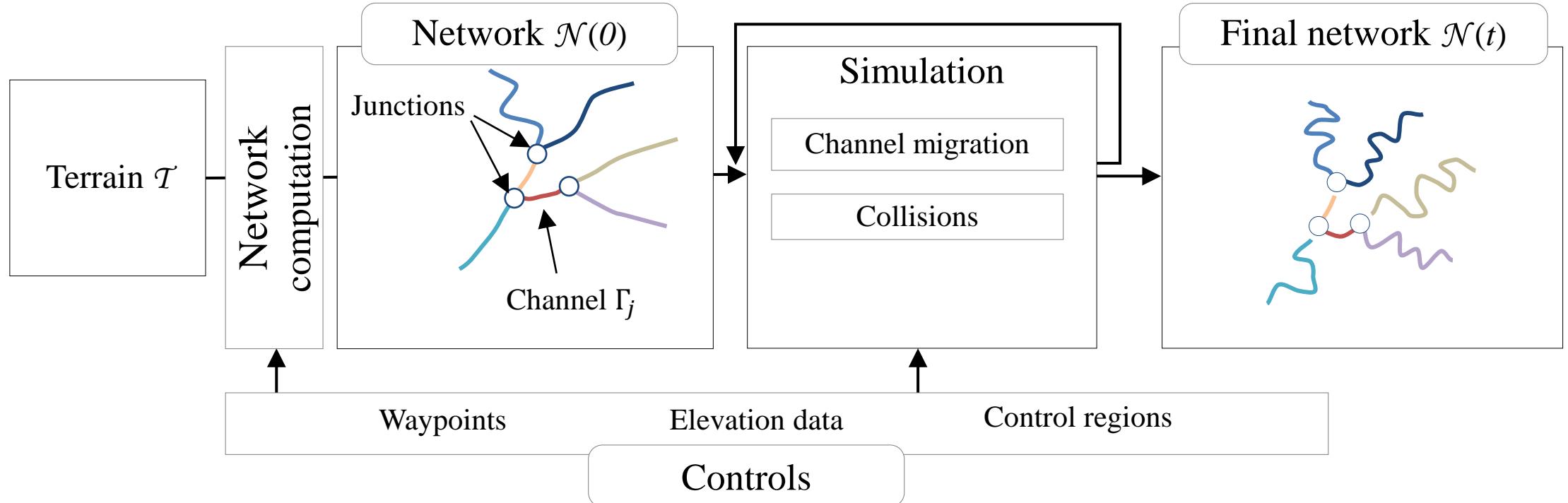
Multiples méandres enchevêtrés

Peu de travaux en **informatique graphique**

Très étudié en **géomorphologie**

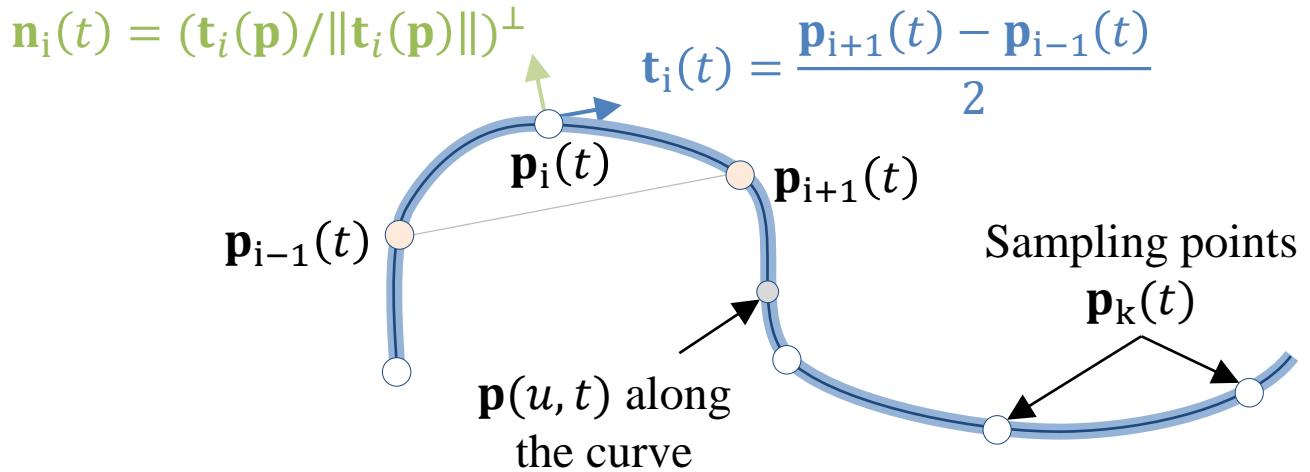
[Génevaux 2013]
[Peytavie 2019]

Vue d'ensemble



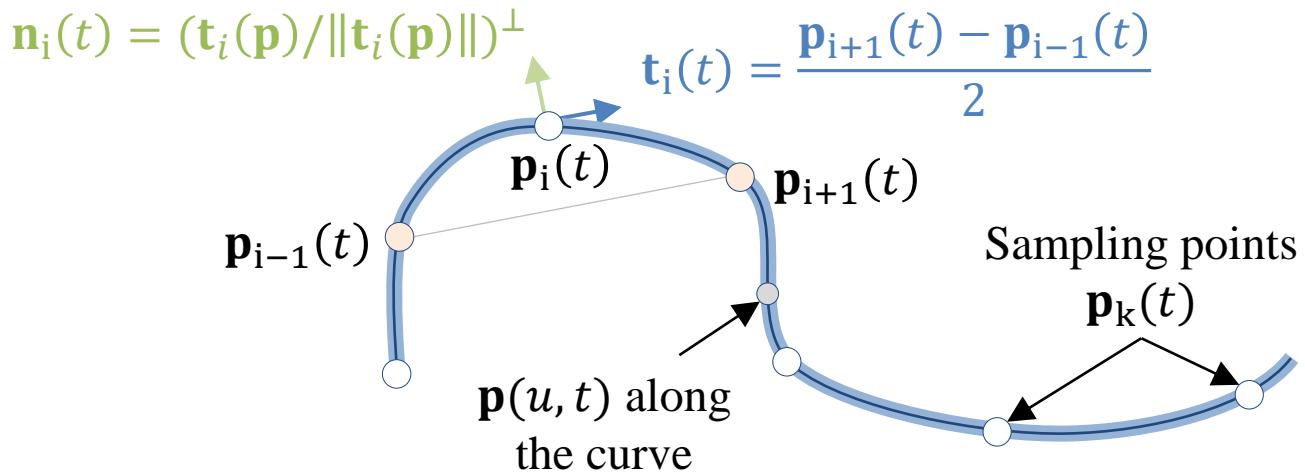
Fondamentaux

Notion de chenal $\Gamma(t)$ avec n points de contrôle $\{\mathbf{p}_k\}$, $k \in [0, n[$ espacés régulièrement



Fondamentaux

Notion de chenal $\Gamma(t)$ avec n points de contrôle $\{\mathbf{p}_k\}$, $k \in [0, n[$ espacés régulièrement



Equation de migration

$$\mathbf{p}_k(t + \delta t) = \mathbf{p}_k(t) + \mathbf{n}_k(t) \mu(\mathbf{p}_k(t)) \delta t$$

On déplace le point \mathbf{p}_k ...

...dans la direction
de la normale \mathbf{n}_k

...d'une certaine quantité μ

[Howard 1994]
[Sylvester 2019]

Taux de migration μ

Equation de migration

$$\mathbf{p}_k(t + \delta t) = \mathbf{p}_k(t) + \mathbf{n}_k(t) \mu(\mathbf{p}_k(t)) \delta t$$

[Sylvester 2019]

Taux de migration

$$\mu(u, t) = \mu_0(u, t) + \sigma^{-2/3} \left[\int_0^\infty \mu_0(u - \zeta, t) k(\zeta) d\zeta \right] \left[\int_0^\infty k(\zeta) d\zeta \right]^{-1}$$

Taux de migration μ

Equation de migration

$$\mathbf{p}_k(t + \delta t) = \mathbf{p}_k(t) + \mathbf{n}_k(t) \mu(\mathbf{p}_k(t)) \delta t$$

[Sylvester 2019]

Taux de migration

Sinuosité du chenal

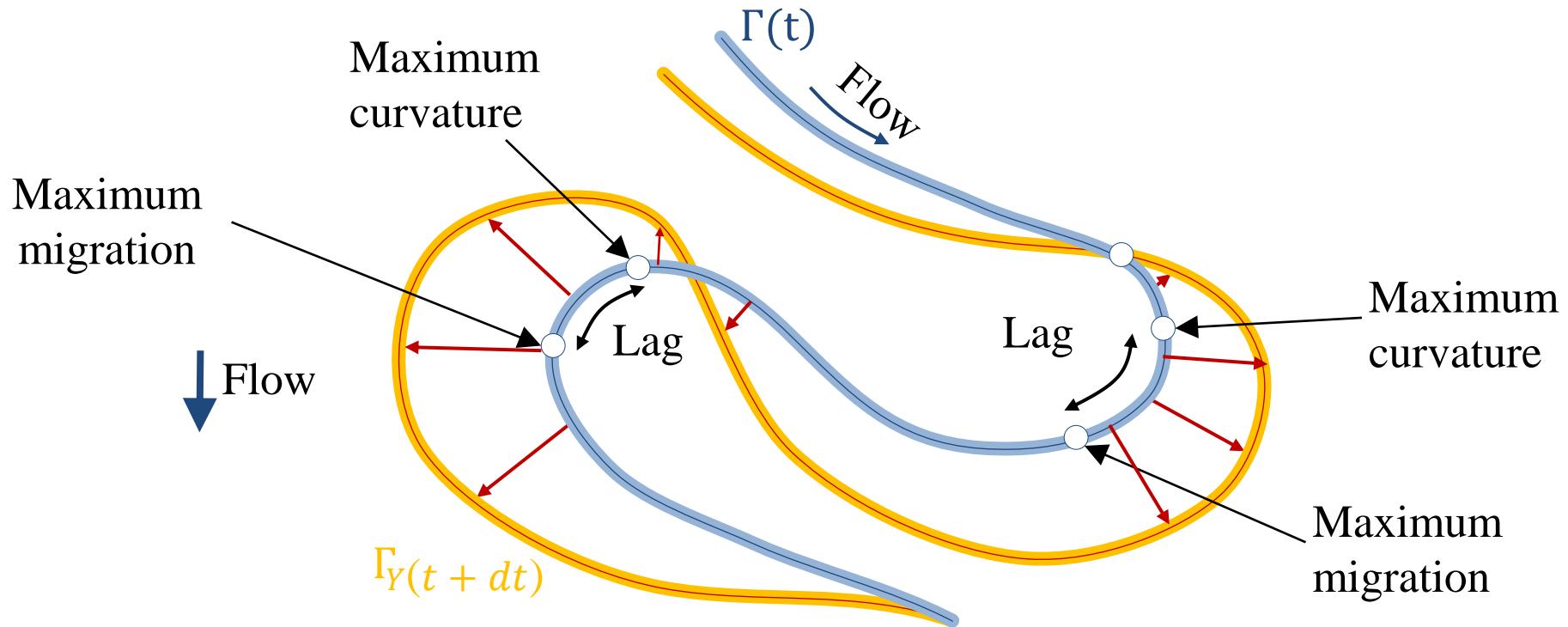
$$\mu(u, t) = \boxed{\mu_0(u, t)} + \sigma^{-2/3} \left[\int_0^\infty \mu_0(u - \zeta, t) k(\zeta) d\zeta \right] \left[\int_0^\infty k(\zeta) d\zeta \right]^{-1}$$

Taux de migration local

$$\mu_0(u, t) = w k_1 \phi_\Gamma(u, t)$$

Courbure

Taux de migration μ



Latence spatiale entre le point de **courbure** maximale et le point de **migration** maximale

Observée sur des méandres réels
[Sylvester 2019]

Migration d'un chenal

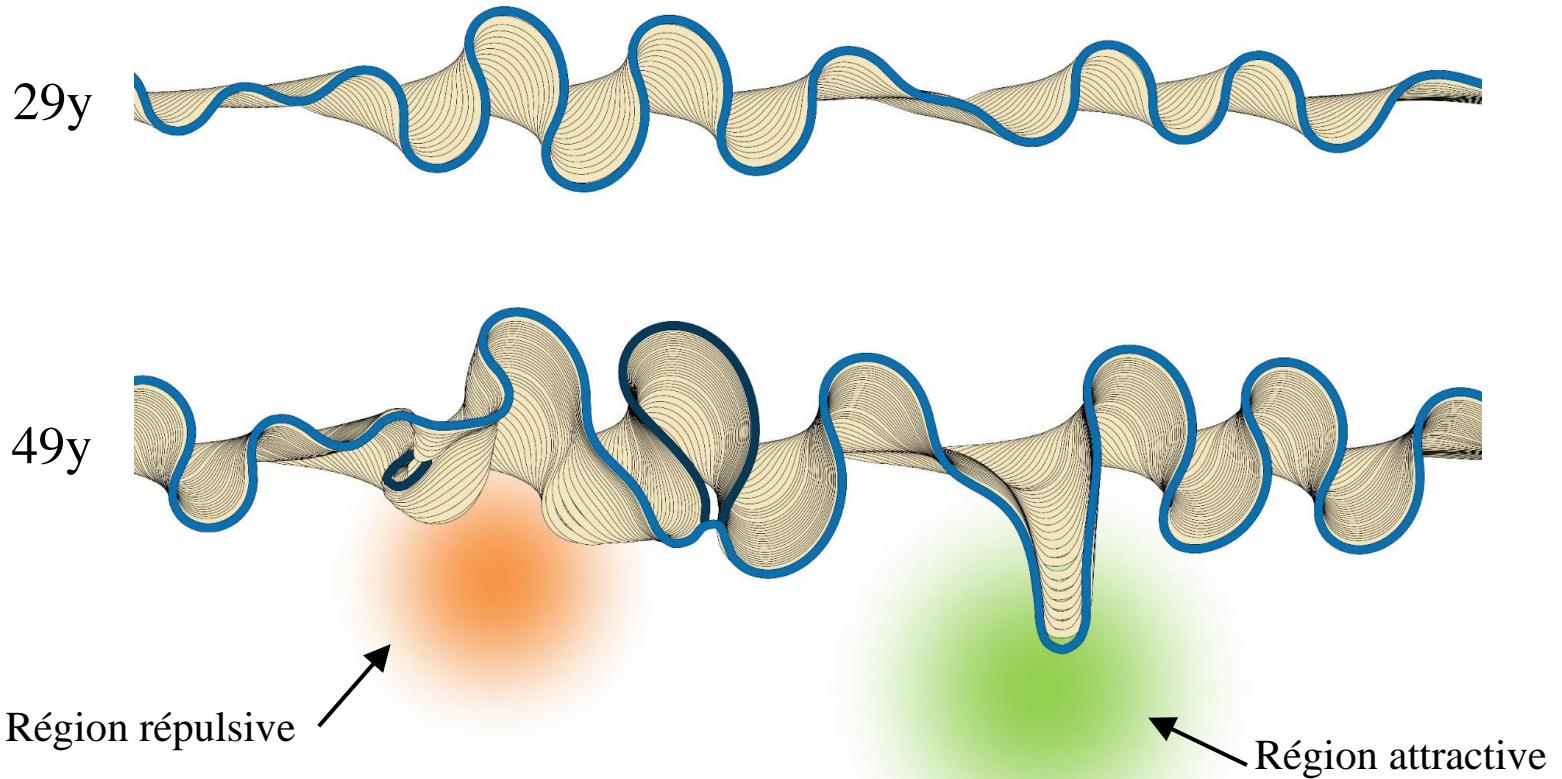


Migration et contrôle

Equation modifiée de migration

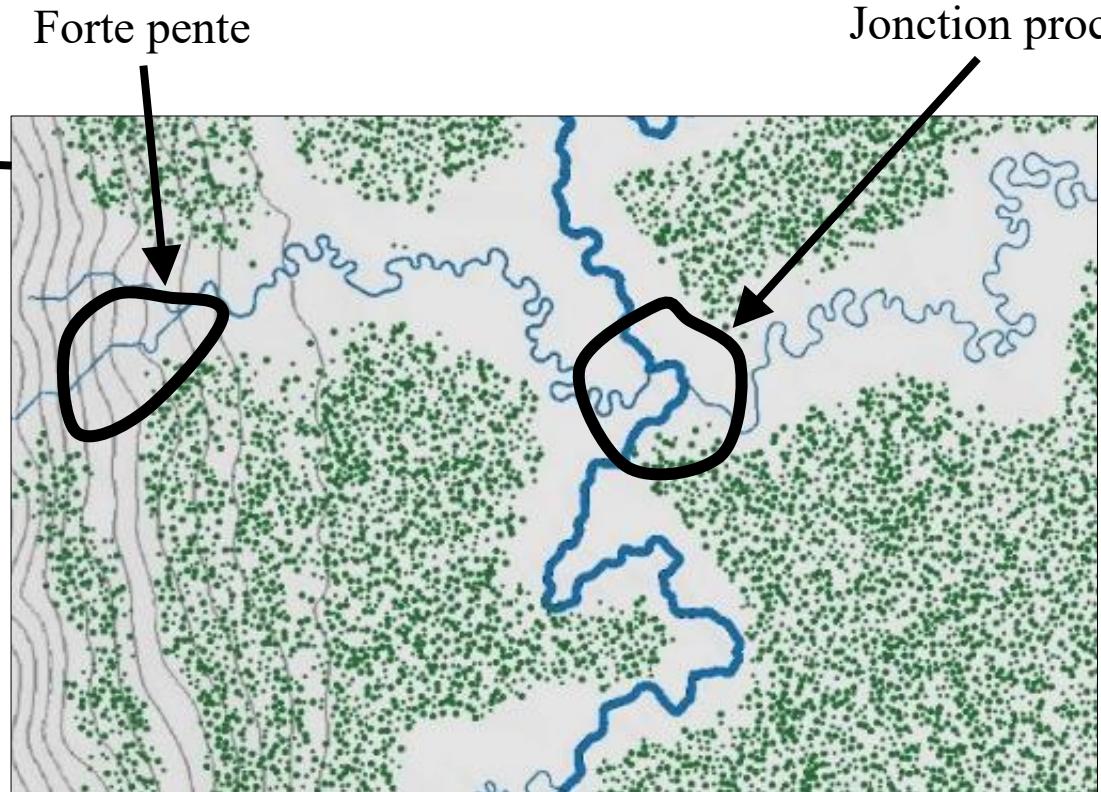
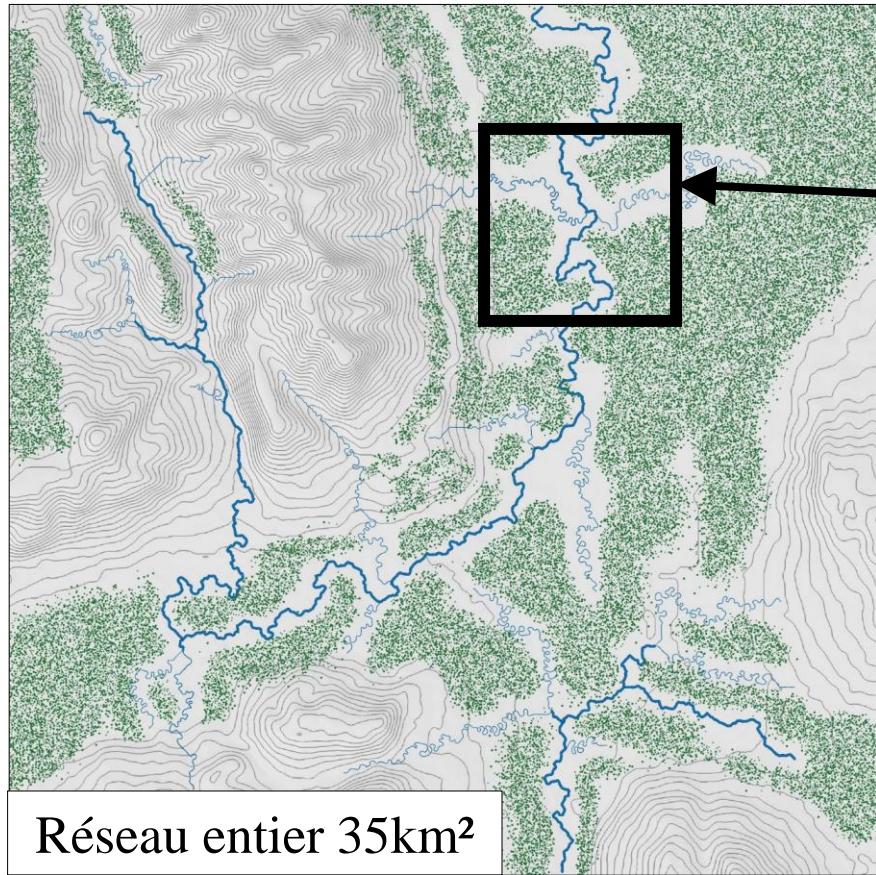
$$\mathbf{p}_k(t + \delta t) = \mathbf{p}_k(t) + \mu(\mathbf{p}_k(t))(\mathbf{n}_k(t) + \nabla c(\mathbf{p}))\delta t$$

Champ de déformation



Passage à l'échelle d'un réseau

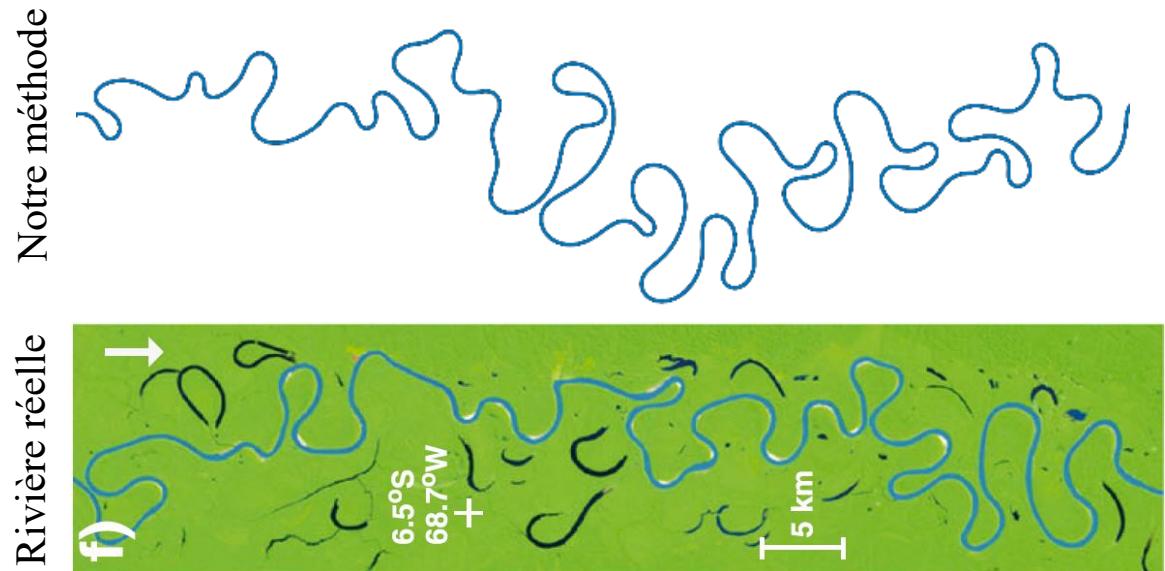
Les artistes manipulent des réseaux hydrographiques couvrant des **dizaines de kilomètres**
Généralisation de la simulation à un réseau de rivières entier



Conclusion

Une **simulation** pour reproduire des méandres de rivière **réalistes**
Des outils de contrôles **directs** et **indirects**

Comparaison visuelle

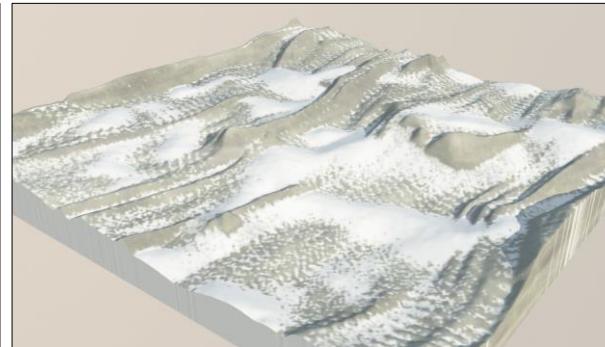
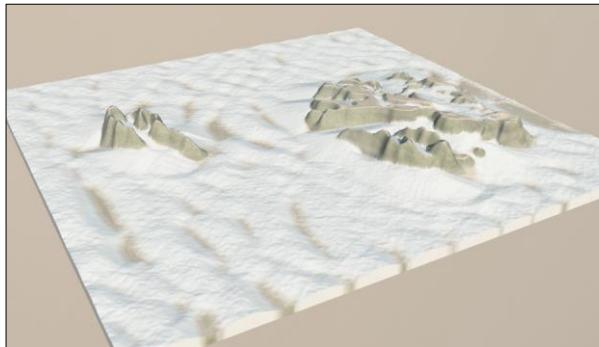
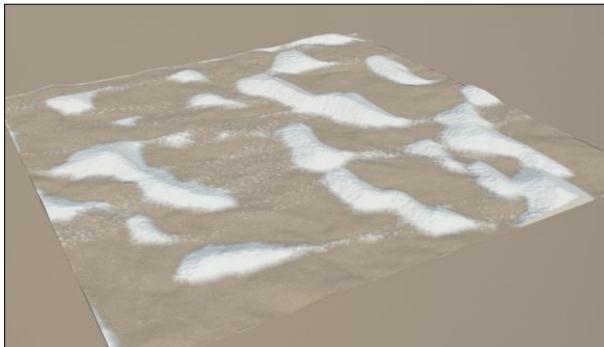


Statistiques & comparaison rivières réelles

Sinuosité par chenal
Fréquence des méandres

Figures	λ/w	σ
Figure 5 [200m]	8.4	1.9
Figure 5 [100m]	14.4	3.6
Figure 5 [50m]	14.2	3.8
Figure 8	10.8	2.4
Figure 23	9.2	1.9
Observed range	[6.2, 12]	> 1.5

Simulation de paysages désertiques



Simulation de paysages désertiques

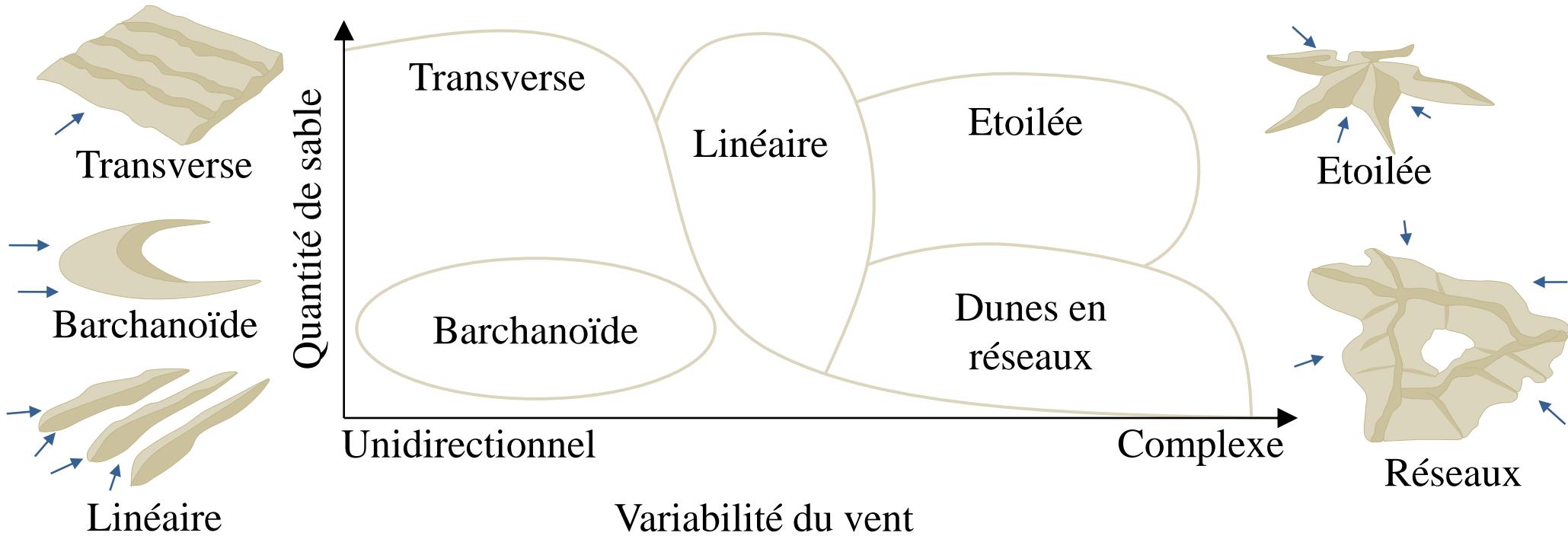
Les déserts représentent **1/3 de la surface terrestre**
Avec des formes variées: **dunes de sable, yardangs, ventifacts...**



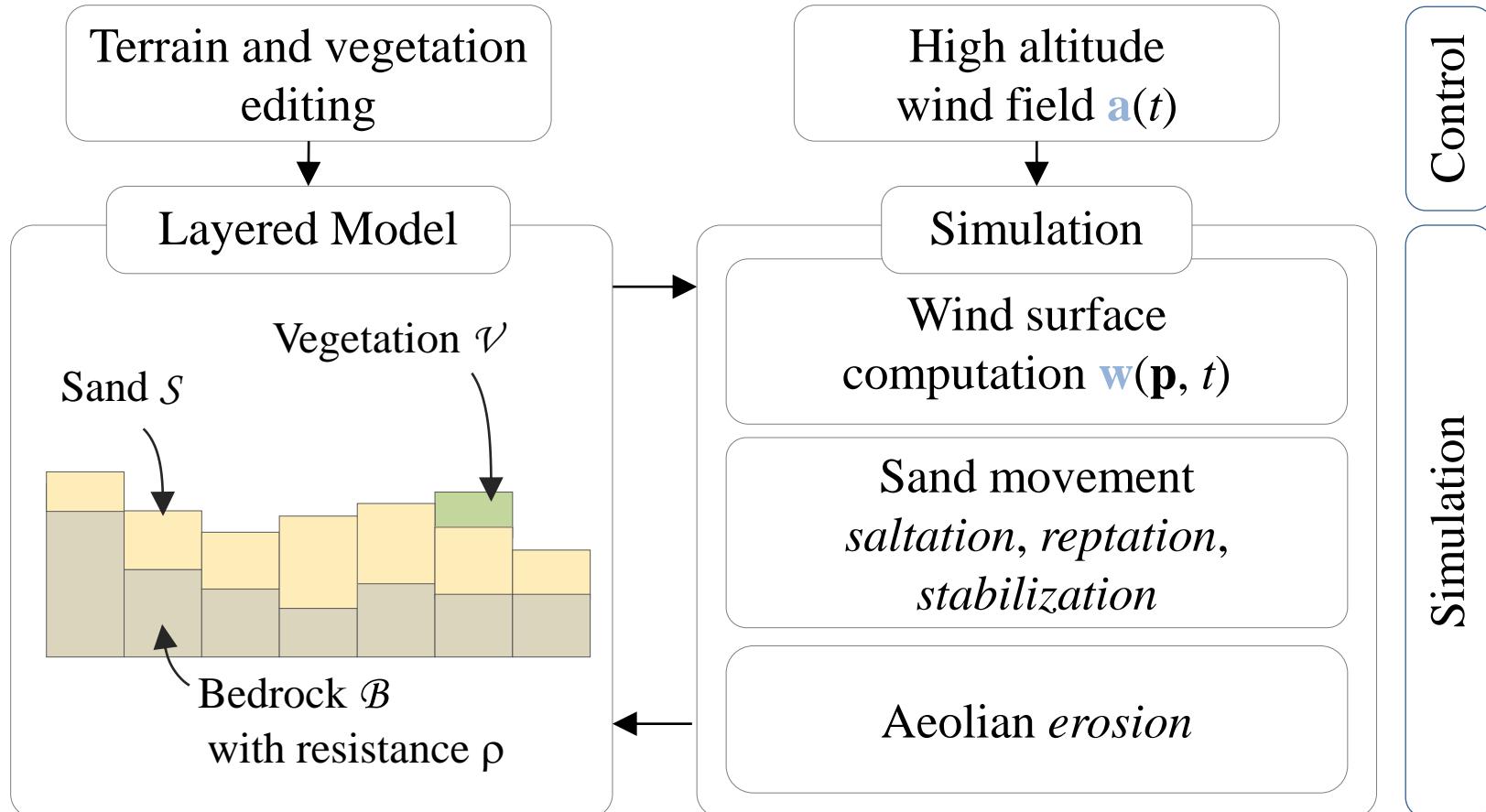
*“It is still not fully clear how **wind**, blowing freely over a desert plain, fashions dunes out of sand” - J. Huggett*

Simulation de paysages désertiques

Le principal agent de formation des dunes est le **vent**
Différents régimes : **unidirectionnel**, des vents **complexes**...



Vue d'ensemble



Calcul du vent à la surface

Problème : **calculer le vent** pour prendre en compte les obstacles du terrain

Approximation procédurale

Calcul du vent à la surface

Problème : **calculer le vent** pour prendre en compte les obstacles du terrain

Accélération du vent avec l'altitude

$$v(\mathbf{p}, t) = a(t)(1 + k_w h(\mathbf{p}))$$

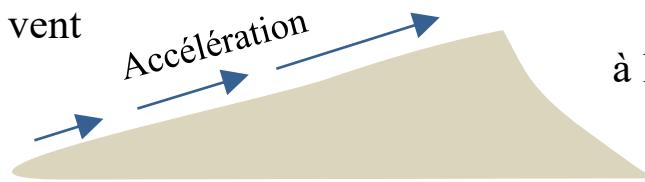
Vent de base

Facteur d'accélération

Altitude

Approximation procédurale

Versant au vent



Versant
à l'ombre du vent

Calcul du vent à la surface

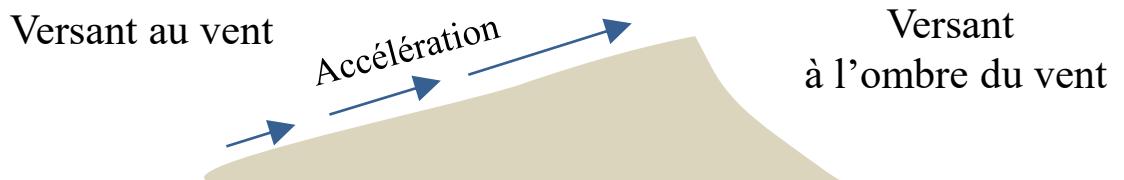
Problème : **calculer le vent** pour prendre en compte les obstacles du terrain

Accélération du vent avec l'altitude

$$v(\mathbf{p}, t) = a(t)(1 + k_w h(\mathbf{p}))$$

Vent de base Facteur d'accélération Altitude

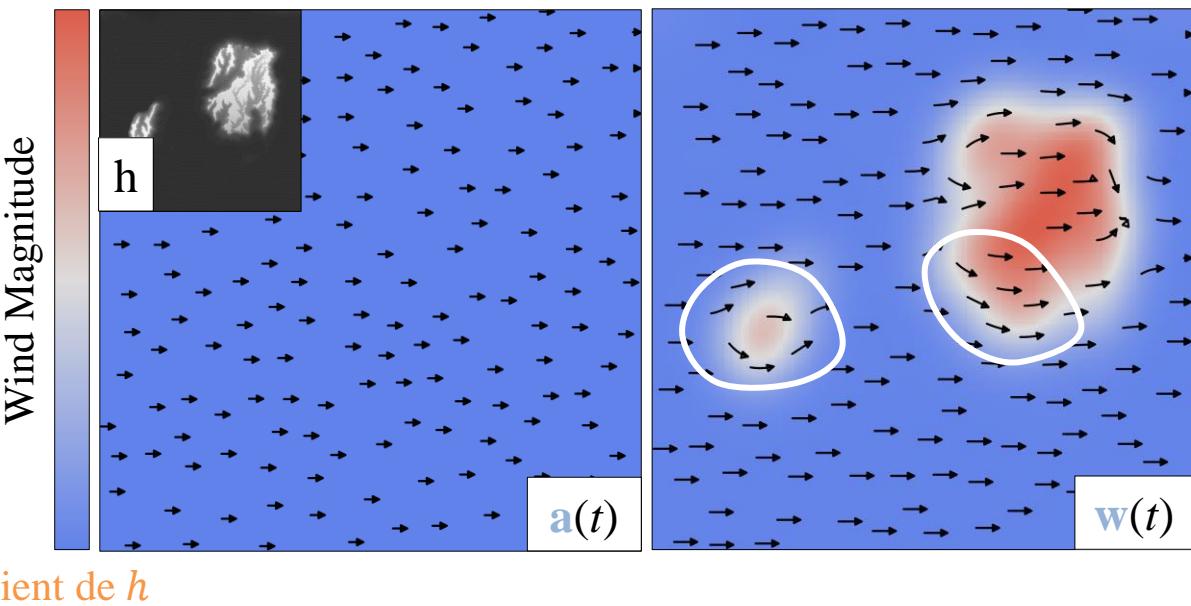
Approximation procédurale



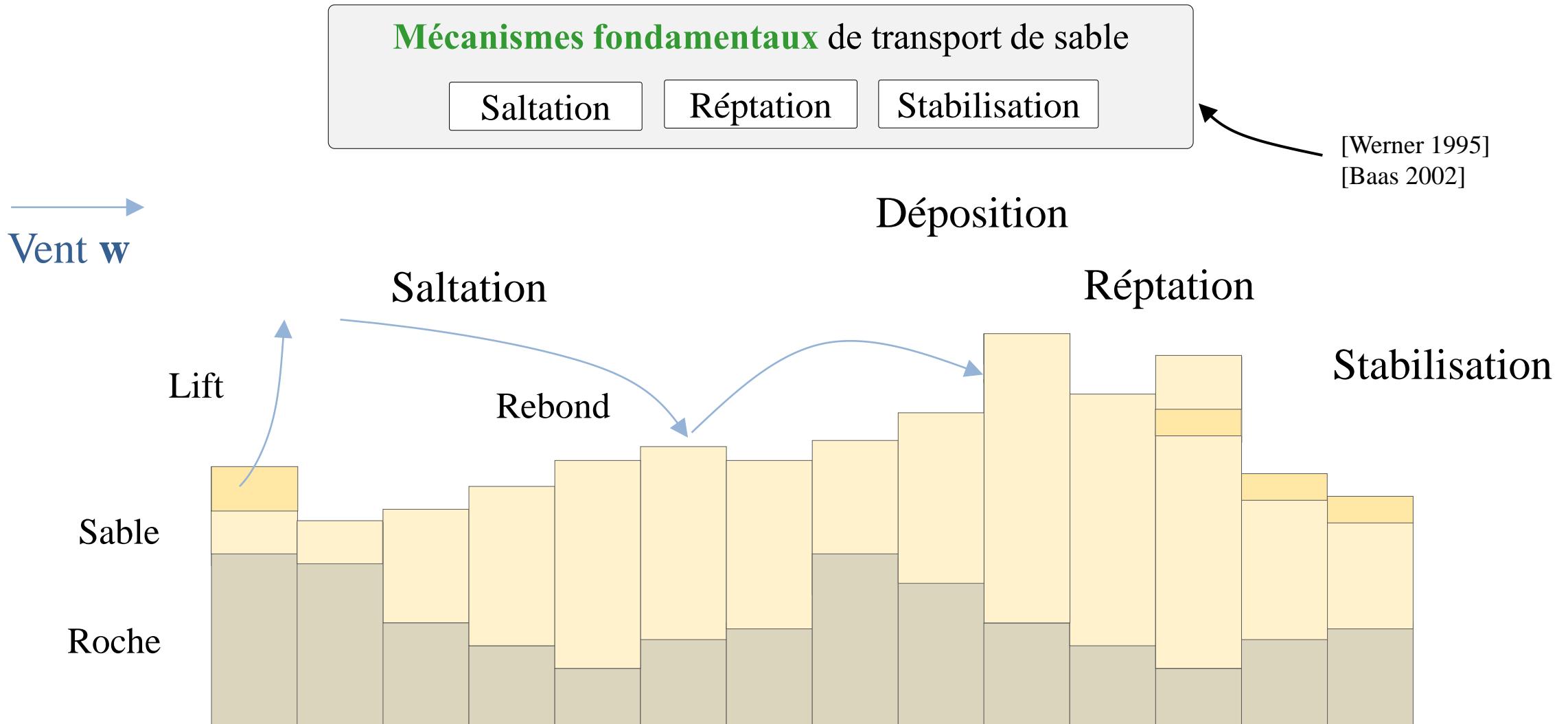
Prise en compte du relief du terrain

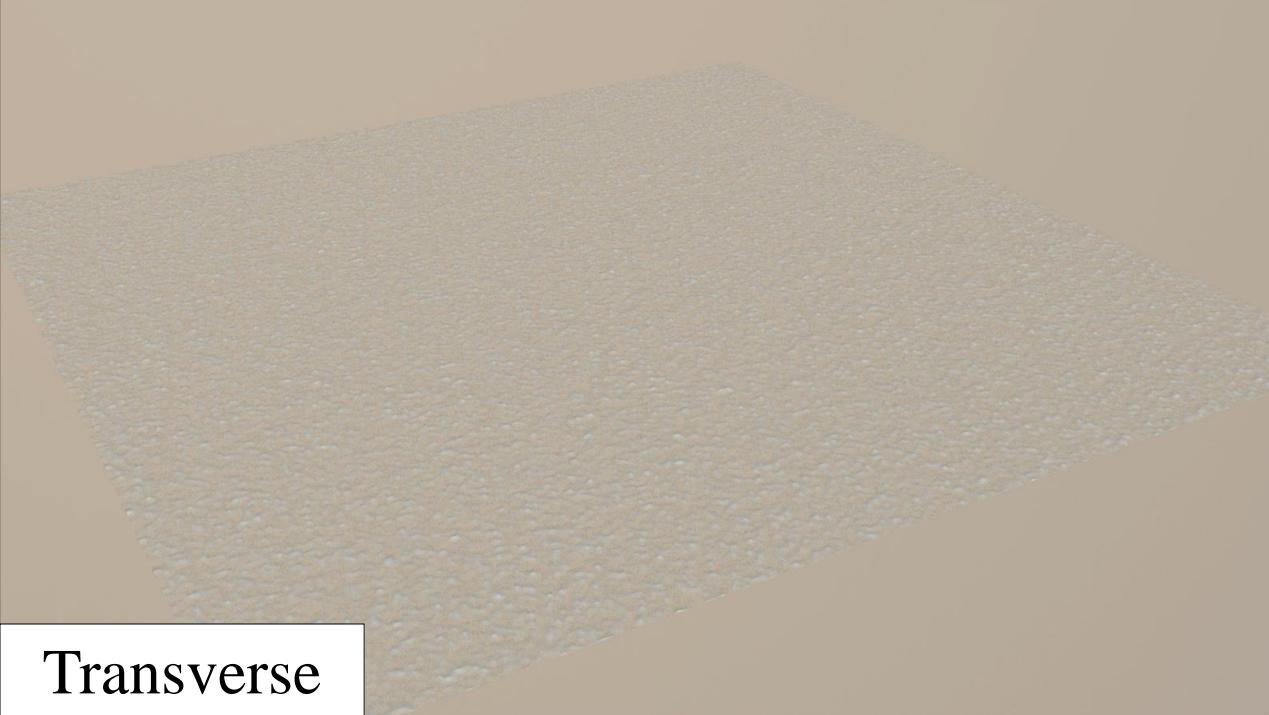
$$w(\mathbf{p}, t) = \sum_{i=0}^n c_i \omega_i \circ v(\mathbf{p}, t)$$
$$\omega_i \circ v(\mathbf{p}, t) = (1 - \alpha)v(\mathbf{p}, t) + \alpha k_i \nabla h_i^\perp(\mathbf{p})$$

Influence de déformation Direction orthogonale au gradient de h

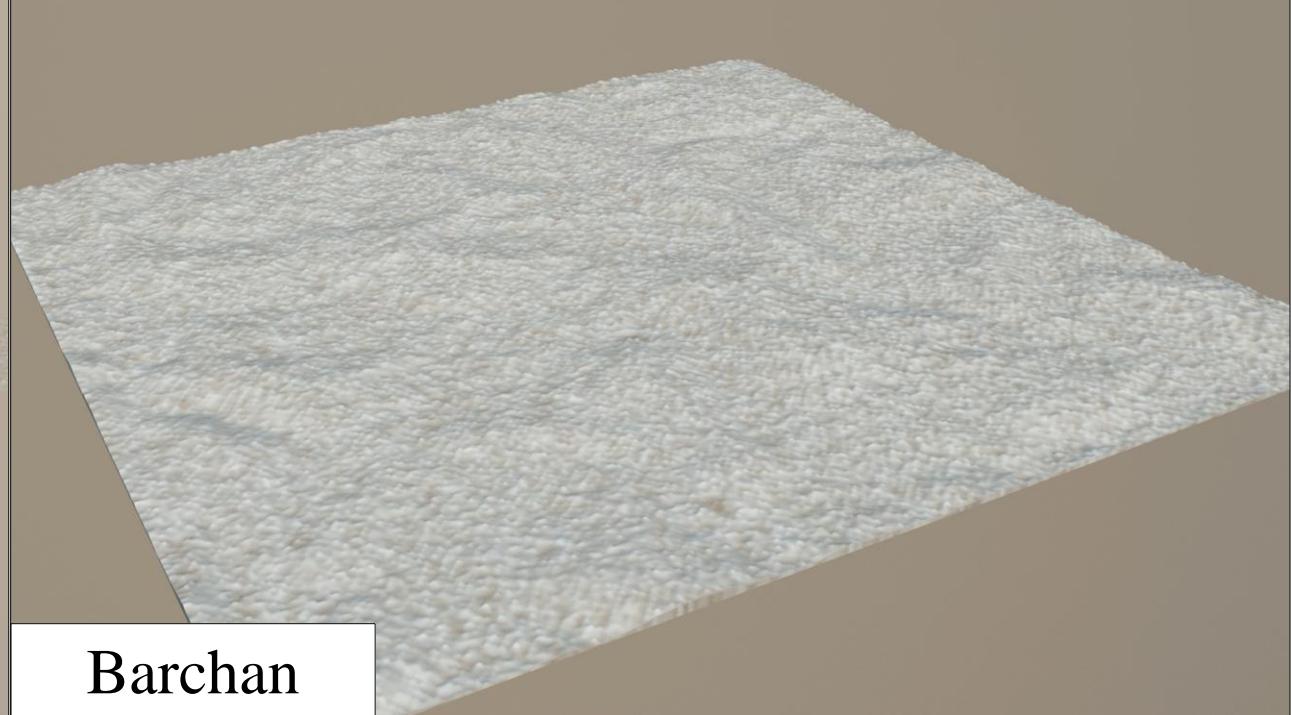


Transport de sable

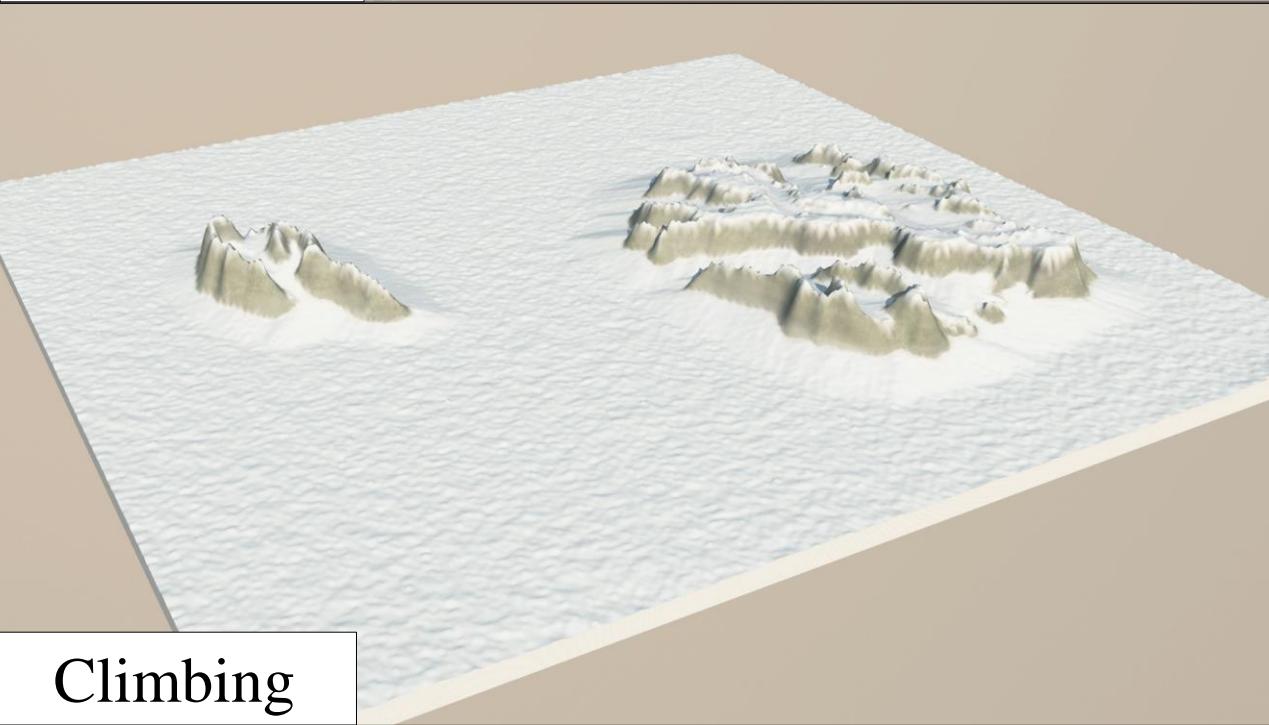




Transverse



Barchan



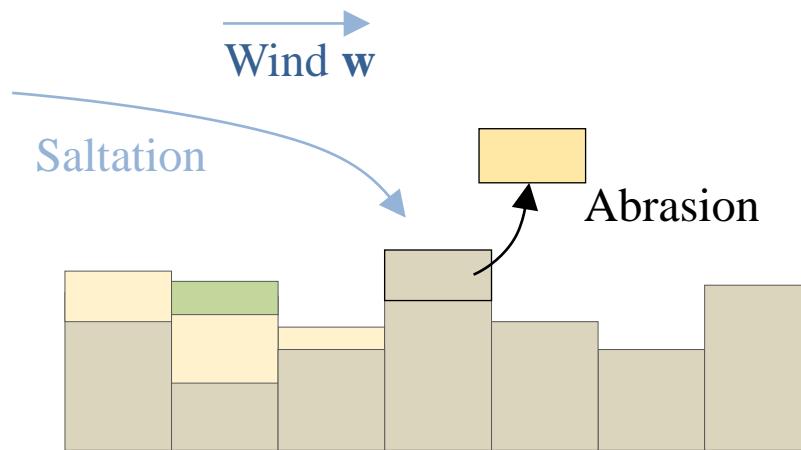
Climbing



Nabkha

Abrasion

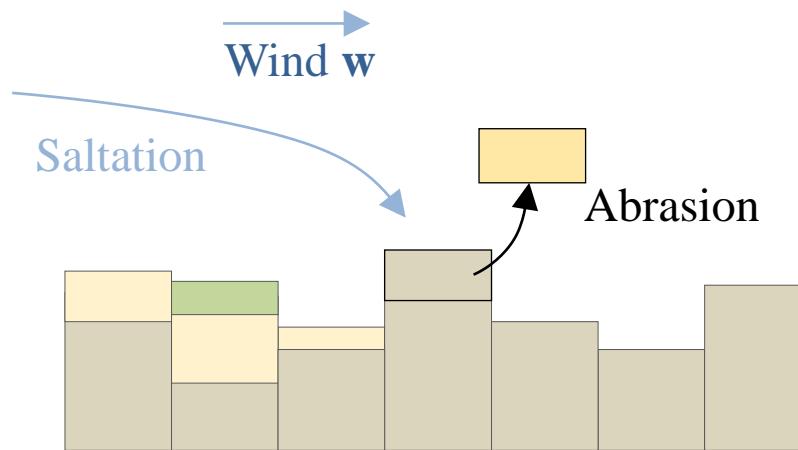
Abrasion : érosion de la couche rocheuse par l'impact du sable



Crédit : Jonathan D. Müller

Abrasion

Abrasion : érosion de la couche rocheuse par l'impact du sable



Crédit : Jonathan D. Müller

Equation d'abrasion

$$\varepsilon = k_a (1 - \rho(p)) \parallel w(p) \parallel (1 - V(p))$$

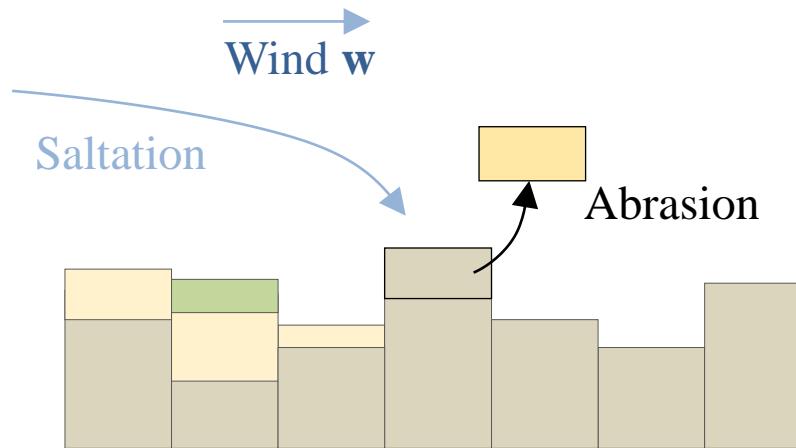
Résistance de la roche

Force du vent

Densité de végétation

Abrasion

Abrasion : érosion de la couche rocheuse par l'impact du sable



Equation d'abrasion

$$\varepsilon = k_a (1 - \rho(p)) \parallel w(p) \parallel (1 - V(p))$$

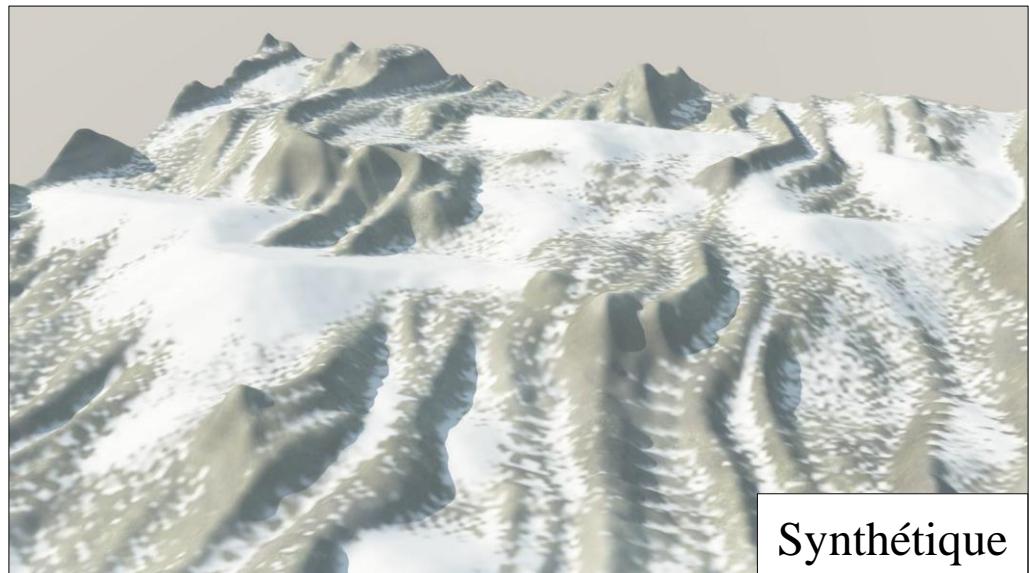
Résistance de la roche

Force du vent

Densité de végétation



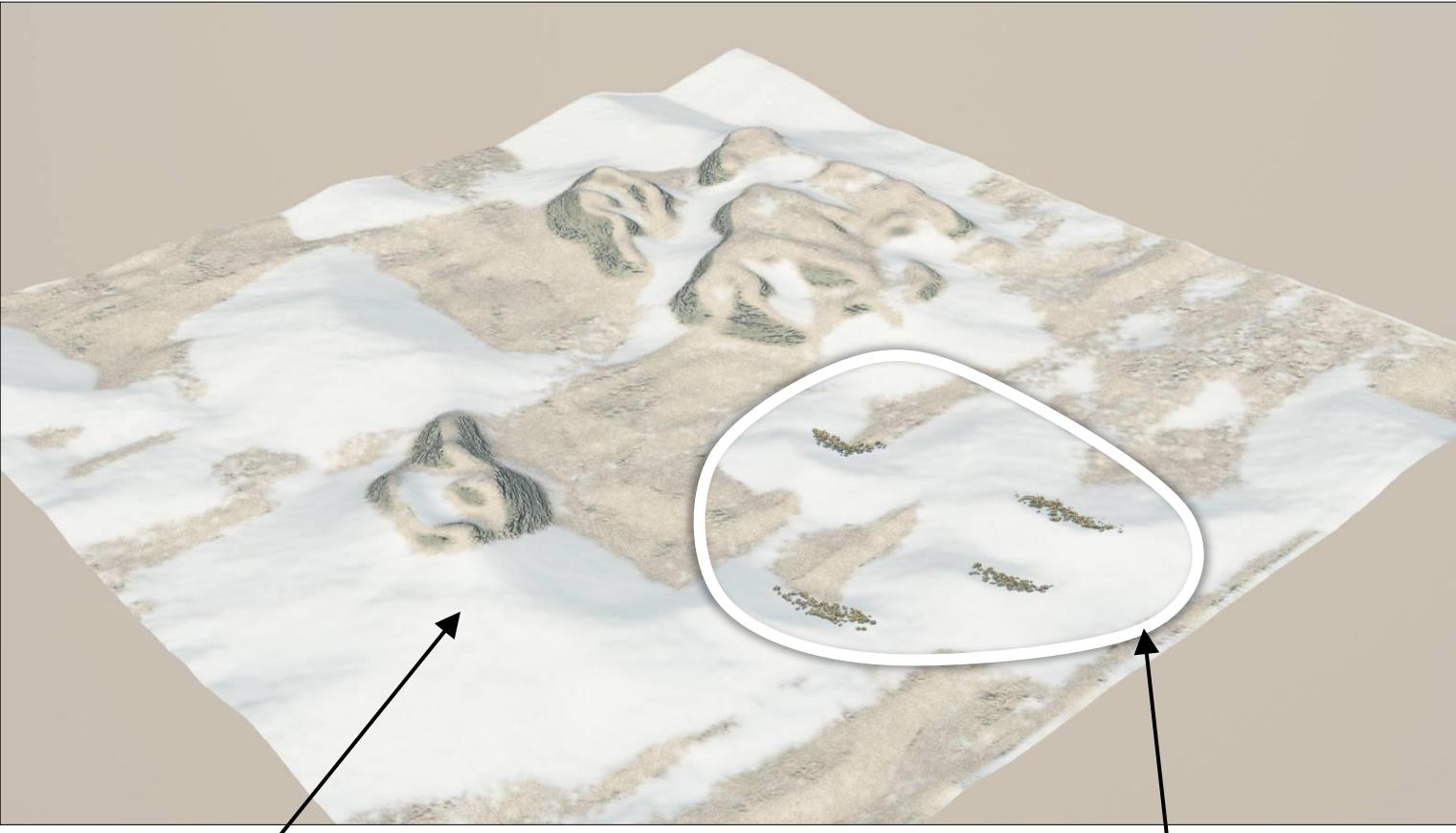
Crédit : Jonathan D. Müller



Conclusion

Contrôle interactif

Simulation de paysages désertiques avec
**yardang, dune nabkha, barchan,
transverse**



Méga dune barchan

Protection par
végétation

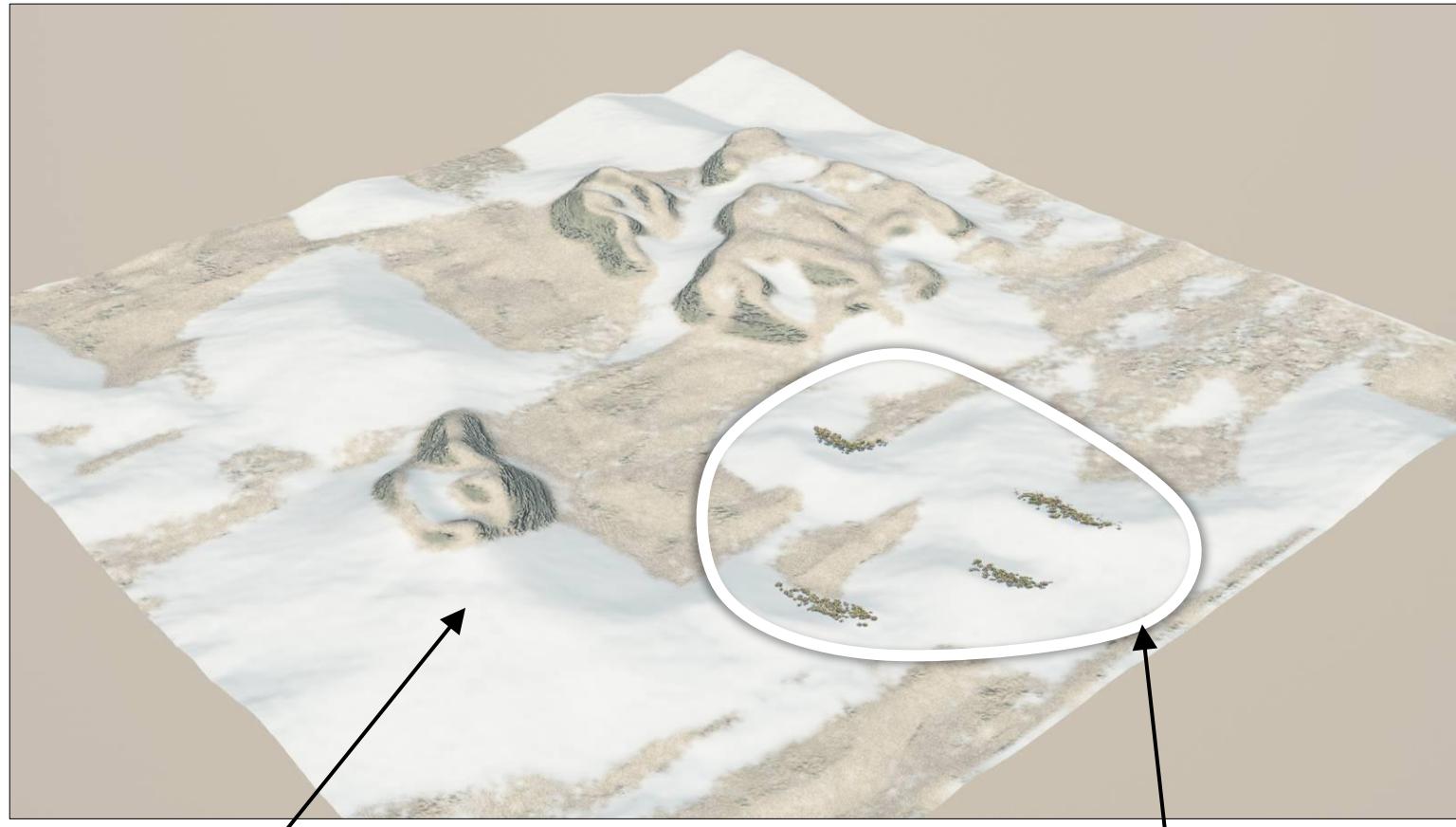
Conclusion

Contrôle interactif

Simulation de paysages désertiques avec
yardang, dune nabkha, barchan,
transverse

Validation partielle de la **forme**
globale et du **placement** des dunes
Manque de reliefs nets : **crêtes**

Amplification procédurale
[Génevaux 2015]

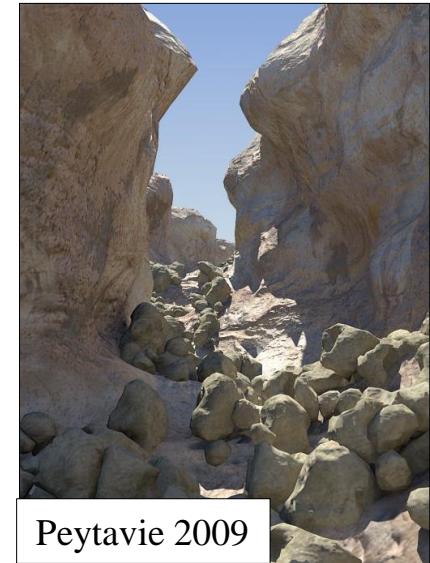
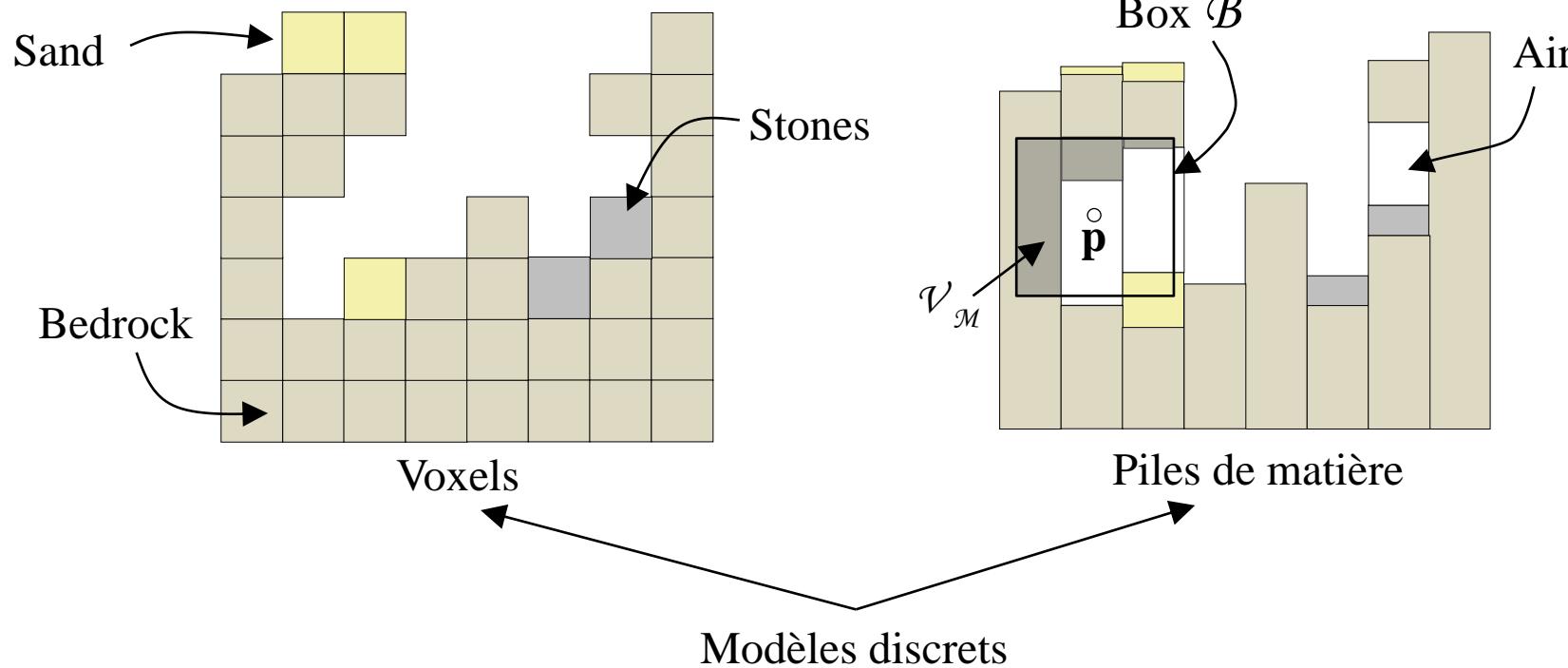


Modélisation et génération de terrains volumiques



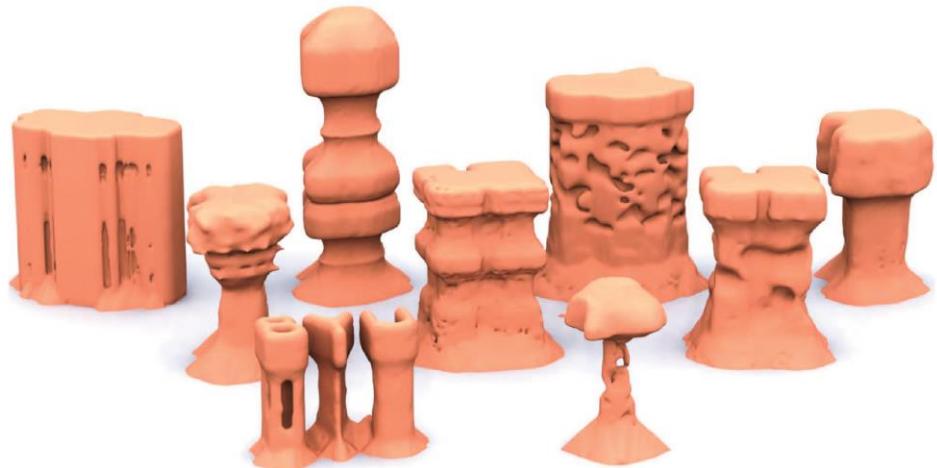
État de l'art : modèles de terrain volumique

Fonction de matériau volumique $v : \mathbf{R}^3 \rightarrow \mathbf{N}$ ← Indice du matériau
Peut représenter **arches, surplombs, grottes**



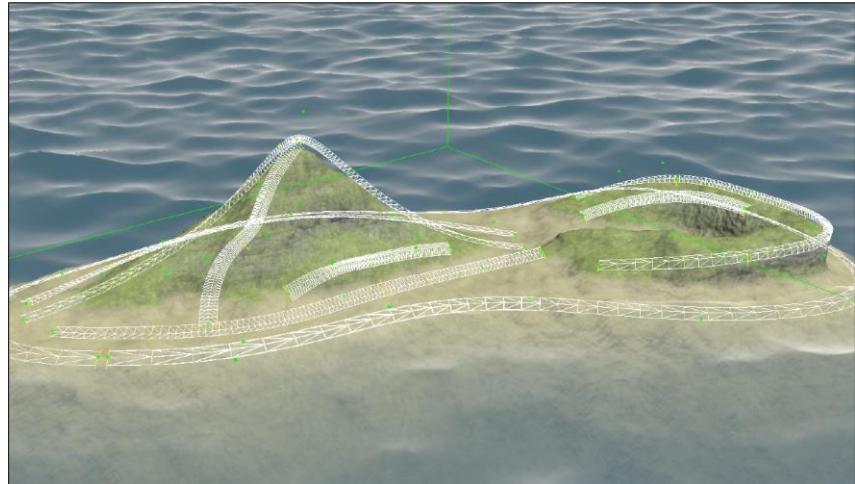
État de l'art : génération de terrains volumiques

Simulation



[Beardall 2007]
[Jones 2010]

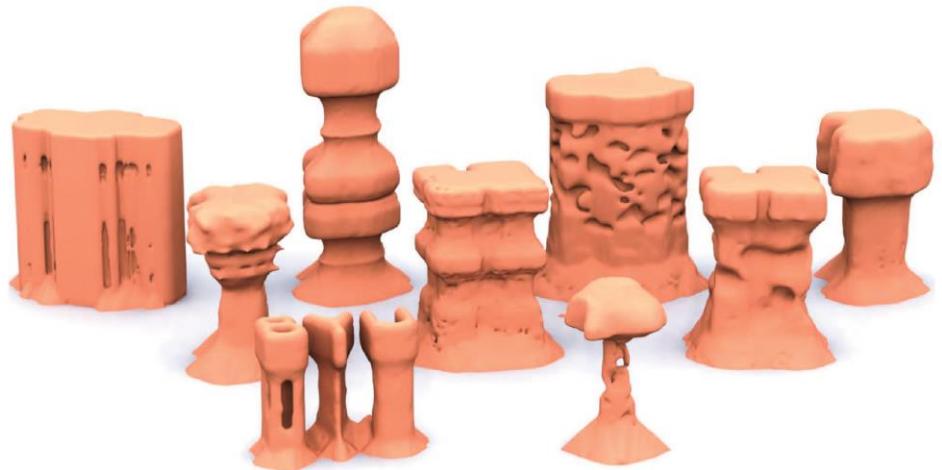
Édition



[Peytavie 2009]
[Becher 2018]

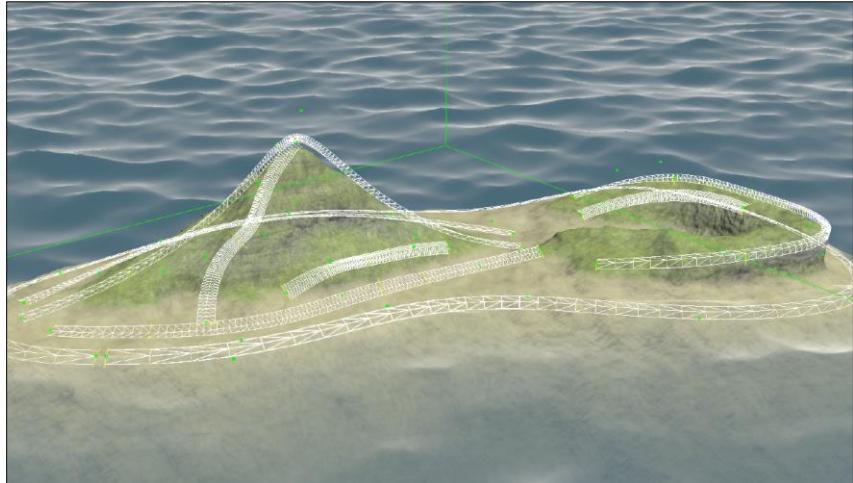
État de l'art : génération de terrains volumiques

Simulation



[Beardall 2007]
[Jones 2010]

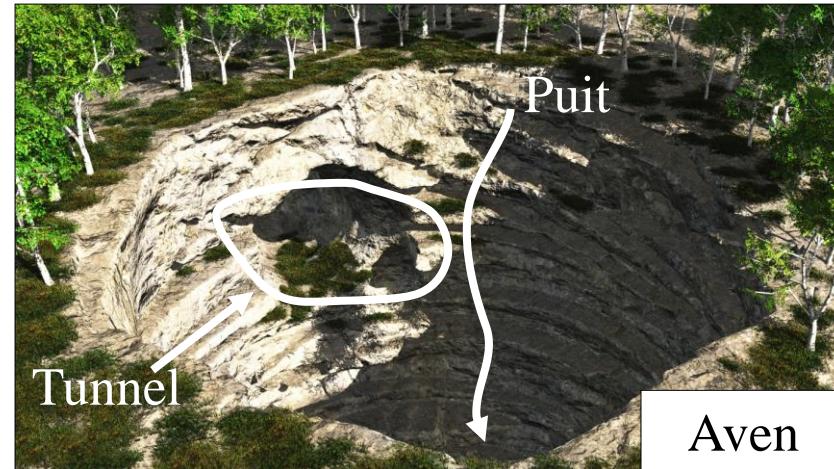
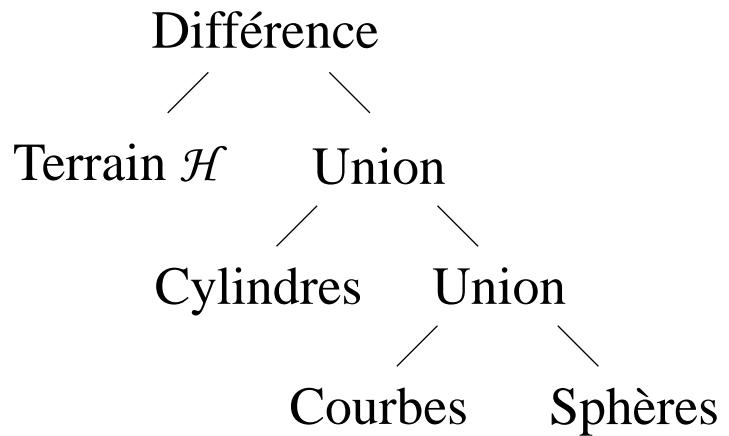
Édition



[Peytavie 2009]
[Becher 2018]

Comment gérer les **grands domaines** ?
Comment **générer** certaines formes caractéristiques ?

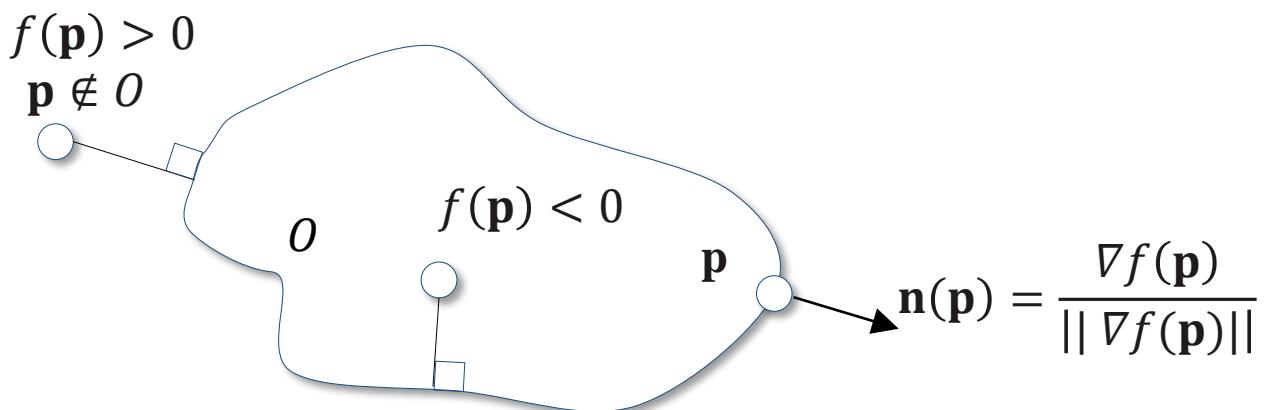
Modèle de surface implicite



Modèle de surface implicite

Idée fondamentale
Surfaces implicites **procédurales**
 $S = \{p \in \mathbb{R}^3 \mid f(p) = 0\}$

On laisse de côté les surfaces
implicites discrètes
[Frisken 2000]



Compact en mémoire
Modélisation **expressive**
Précision théorique **infinie**

Fonctions de distance signées 1-Lipschitziennes

Modèle : fonctions de distance signées (SDF)

$$f(\mathbf{p}) = \begin{cases} d(\mathbf{p}) & \text{si } \mathbf{p} \notin O \\ 0 & \text{si } \mathbf{p} \in S \\ -d(\mathbf{p}) & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$d(\mathbf{p}) = \min_{\mathbf{q} \in S} \|\mathbf{p} - \mathbf{q}\|$$

Distance euclidienne
à la surface

Fonctions de distance signées 1-Lipschitziennes

Modèle : fonctions de distance signées (SDF)

$$f(\mathbf{p}) = \begin{cases} d(\mathbf{p}) & \text{si } \mathbf{p} \notin O \\ 0 & \text{si } \mathbf{p} \in S \\ -d(\mathbf{p}) & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$d(\mathbf{p}) = \min_{\mathbf{q} \in S} \|\mathbf{p} - \mathbf{q}\|$$

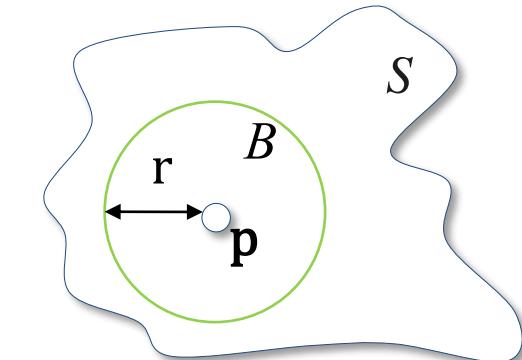
Distance euclidienne
à la surface

Propriété de Lipschitz

$$\forall (\mathbf{p}, \mathbf{q}) \in \Omega \times \Omega, \\ |f(\mathbf{p}) - f(\mathbf{q})| \leq \lambda \|\mathbf{p} - \mathbf{q}\|$$

Critère d'exclusion

$$\forall \mathbf{p} \in \mathbf{R}^3, \\ B(\mathbf{p}, |f(\mathbf{p})|) \cap S = \emptyset$$



$$r = \frac{|f(\mathbf{p})|}{\lambda}$$

Fonctions de distance signées 1-Lipschitziennes

Modèle : fonctions de distance signées (SDF)

$$f(\mathbf{p}) = \begin{cases} d(\mathbf{p}) & \text{si } \mathbf{p} \notin S \\ 0 & \text{si } \mathbf{p} \in S \\ -d(\mathbf{p}) & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$d(\mathbf{p}) = \min_{\mathbf{q} \in S} \|\mathbf{p} - \mathbf{q}\|$$

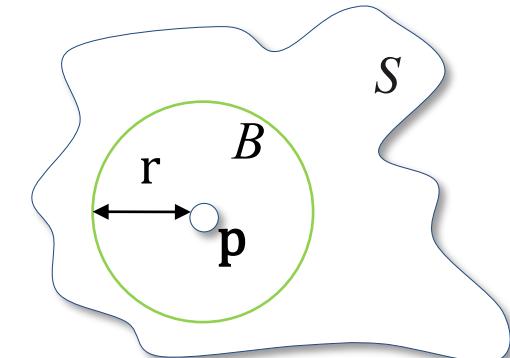
Distance euclidienne
à la surface

Propriété de Lipschitz

$$\forall (\mathbf{p}, \mathbf{q}) \in \Omega \times \Omega, \quad |f(\mathbf{p}) - f(\mathbf{q})| \leq \lambda \|\mathbf{p} - \mathbf{q}\|$$

Critère d'exclusion

$$\forall \mathbf{p} \in \mathbb{R}^3, \quad B(\mathbf{p}, |f(\mathbf{p})|) \cap S = \emptyset$$



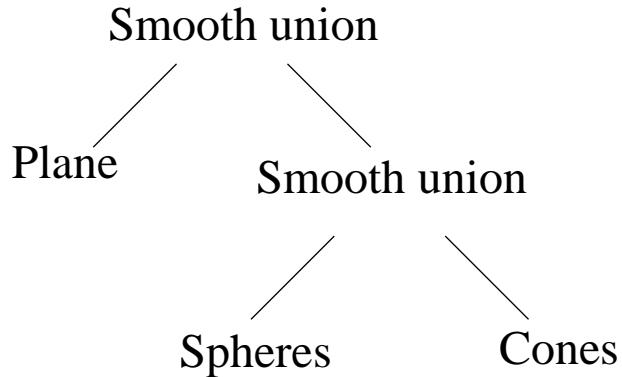
$$r = \frac{|f(\mathbf{p})|}{\lambda}$$

Modèle : SDF 1-Lipschitziennes ($\lambda = 1$)

$$\forall \mathbf{p} \in \mathbb{R}^3, \quad |b(\mathbf{p})| \leq |f(\mathbf{p})|$$

Borne inférieure de la
distance euclidienne à la surface

Arbre de construction hiérarchique



Inspiration du Blob Tree
[Wyvill 1998]

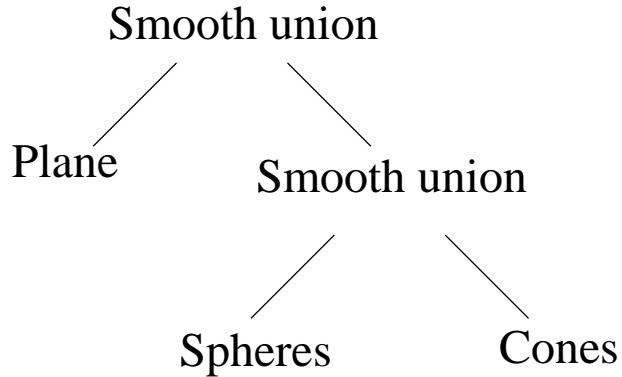
Primitives à squelette

Boîte Sphère Cylindre Courbe

Opérateurs

CSG CSG Lisse Warping Transformations

Arbre de construction hiérarchique



Inspiration du Blob Tree
[Wyvill 1998]

Primitives à squelette

Boîte Sphère Cylindre Courbe

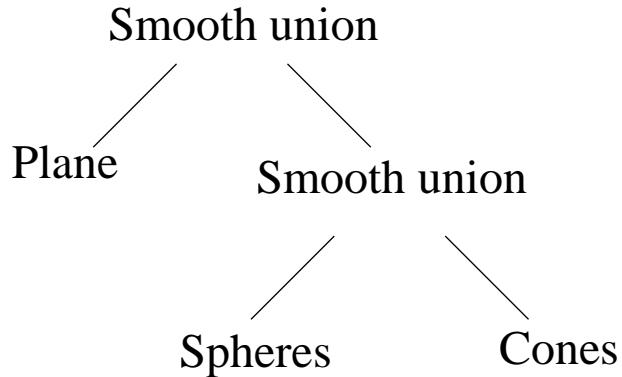
Opérateurs

CSG CSG Lisse Warping Transformations

Objectifs

Modéliser des **terrains volumiques** avec des **SDF** par **arbres de construction**

Arbre de construction hiérarchique



Inspiration du Blob Tree
[Wyvill 1998]

Primitives à squelette

Boîte Sphère Cylindre Courbe

Opérateurs

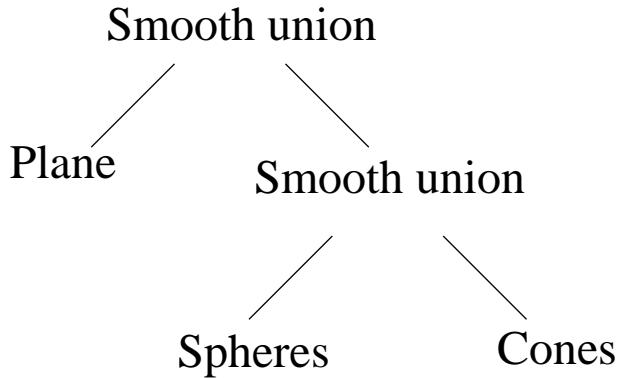
CSG CSG Lisse Warping Transformations

Objectifs

Modéliser des **terrains volumiques** avec des **SDF** par **arbres de construction**

Comment adapter les **modèles d'élévation** à un contexte volumique ?

Arbre de construction hiérarchique



Inspiration du Blob Tree
[Wyvill 1998]

Primitives à squelette

Boîte Sphère Cylindre Courbe

Opérateurs

CSG CSG Lisse Warping Transformations

Objectifs

Modéliser des **terrains volumiques** avec des **SDF** par **arbres de construction**

Comment adapter les **modèles d'élévation** à un contexte volumique ?
Comment **générer** des reliefs volumiques ?

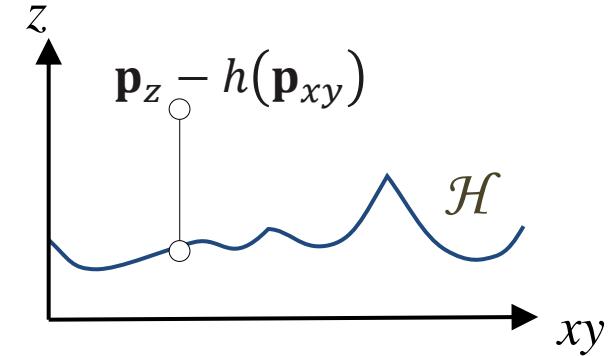
Modélisation volumique : modèles d'élévation

Primitive volumique à partir d'une **fonction d'élévation** $h : \mathbf{R}^2 \rightarrow \mathbf{R}$

SDF 1-Lipschitzienne pour une fonction d'élévation

$$f_H(\mathbf{p}) = \frac{\mathbf{p}_z - h(\mathbf{p}_{xy})}{\sqrt{1 + \lambda^2}}$$

Norme sup du gradient de $\|\nabla h(\mathbf{p})\|$



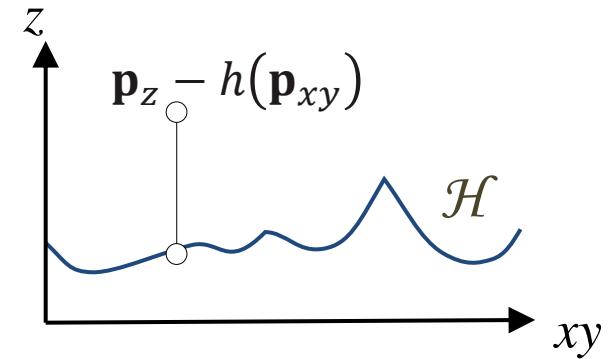
Modélisation volumique : modèles d'élévation

Primitive volumique à partir d'une **fonction d'élévation** $h : \mathbf{R}^2 \rightarrow \mathbf{R}$

SDF 1-Lipschitzienne pour une fonction d'élévation

$$f_H(\mathbf{p}) = \frac{\mathbf{p}_z - h(\mathbf{p}_{xy})}{\sqrt{1 + \lambda^2}}$$

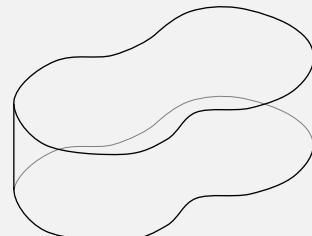
Norme sup du gradient de $\|\nabla h(\mathbf{p})\|$



Combinaison avec un support compact



$$f_H(\mathbf{p})$$



$$f_P(\mathbf{p})$$



$$f_T(\mathbf{p}) = \max(f_H(\mathbf{p}), f_P(\mathbf{p}))$$

Génération de reliefs volumiques : échelles

Problème : génération d'une **variété** de formes volumiques

Génération de reliefs volumiques : échelles

Problème : génération d'une **variété** de formes volumiques

Distinction en **différentes échelles géologiques**



Micro (quelques mètres)

Détails de falaise



Méso (quelques dizaines de mètres)

Arches, surplombs



Macro (> 50m)

Réseaux karstiques profonds

Génération de reliefs volumiques : échelles

Problème : génération d'une **variété** de formes volumiques

Distinction en **différentes échelles géologiques**



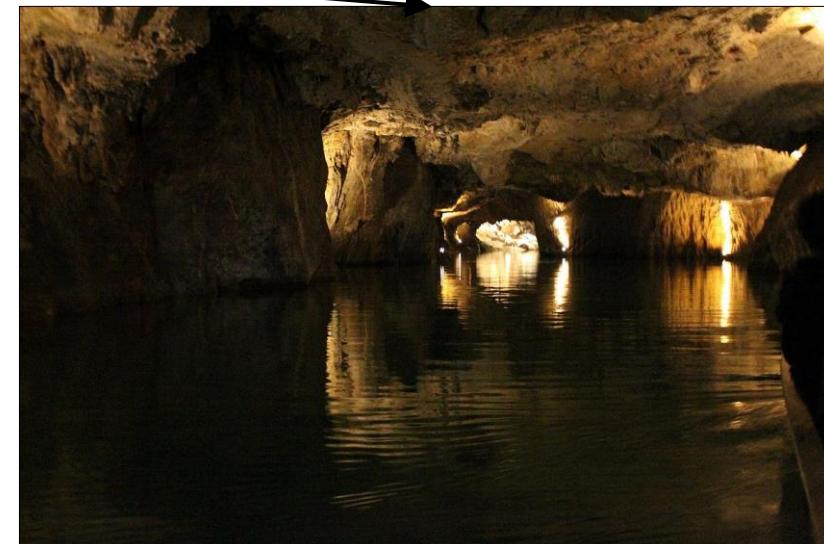
Micro (quelques mètres)

Détails de falaise



Méso (quelques dizaines de mètres)

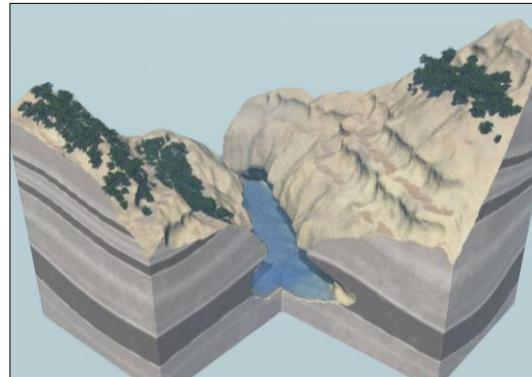
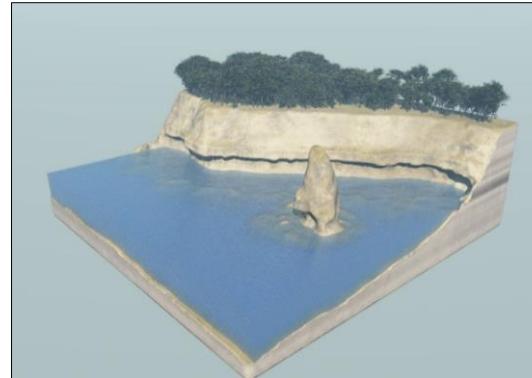
Arches, surplombs



Macro (> 50m)

Réseaux karstiques profonds

Génération de reliefs méso-échelle



Génération de reliefs méso-échelle

Problème : générer des reliefs volumiques à **méso-échelle**

Arches, surplombs,
falaises karstiques

Génération de reliefs méso-échelle

Problème : générer des reliefs volumiques à **méso-échelle**

Arches, surplombs,
falaises karstiques

Approche **simulation** ou **procédurale**

Erosion par invasion-percolation



Génération de reliefs méso-échelle

Problème : générer des reliefs volumiques à **méso-échelle**

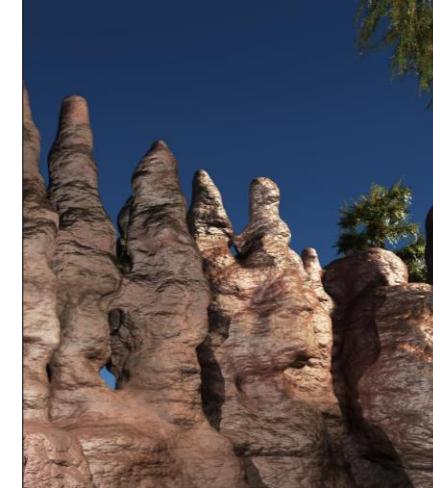
Arches, surplombs,
falaises karstiques

Approche **simulation** ou **procédurale**

Erosion par invasion-percolation



Grammaires de formes



Modèle volumique de perméabilité

Problème : caractériser la **perméabilité 3D**

Fonction de perméabilité $\rho : \mathbf{R}^3 \rightarrow \mathbf{R}$

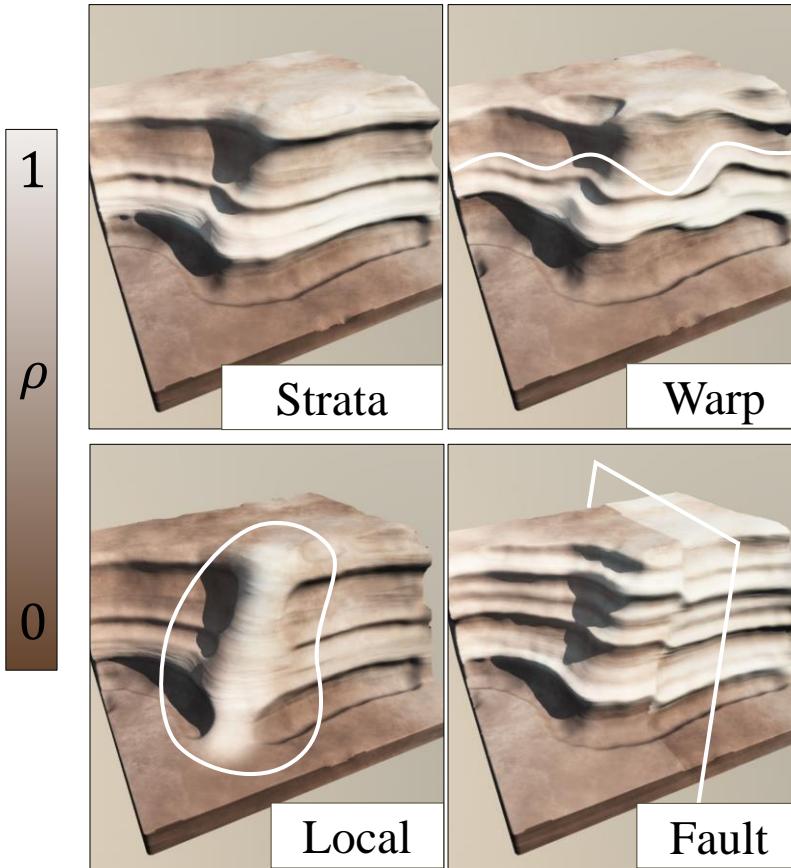
Attention, ce n'est pas
la fonction f du terrain

Modèle volumique de perméabilité

Problème : caractériser la **perméabilité 3D**

Fonction de perméabilité $\rho : \mathbf{R}^3 \rightarrow \mathbf{R}$

Attention, ce n'est pas
la fonction f du terrain

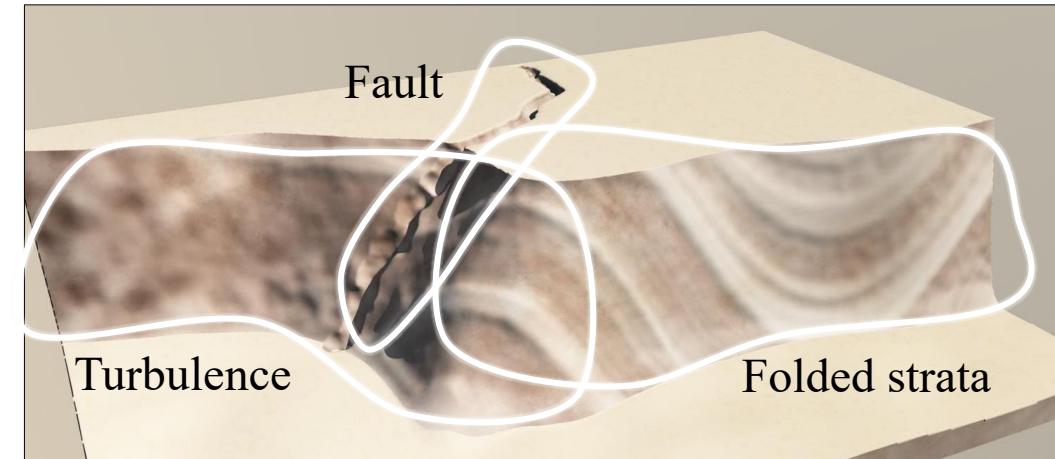
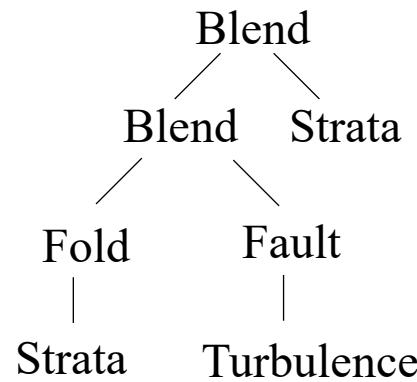
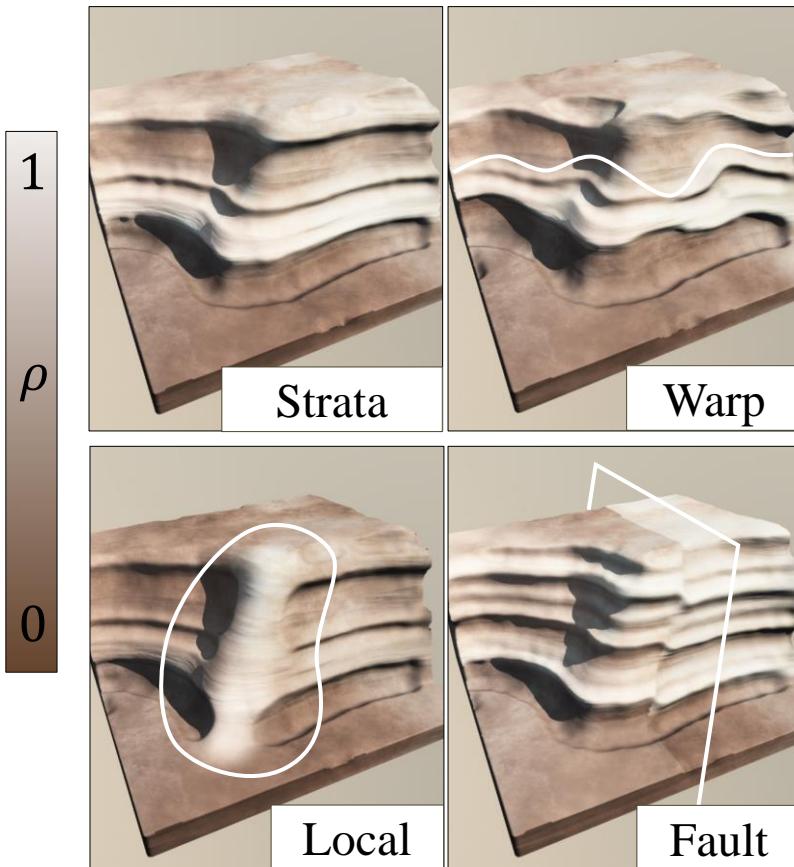


Modèle volumique de perméabilité

Problème : caractériser la **perméabilité 3D**

Fonction de perméabilité $\rho : \mathbf{R}^3 \rightarrow \mathbf{R}$

Attention, ce n'est pas la fonction f du terrain

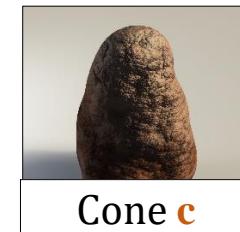
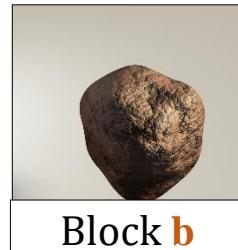
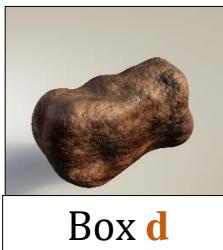


Hoodoos par grammaires de formes ouvertes

Processus de **croissance** par grammaire de formes
Symboles terminaux : **primitives à squelette**

On fait **varier la taille s**
en fonction de la
perméabilité

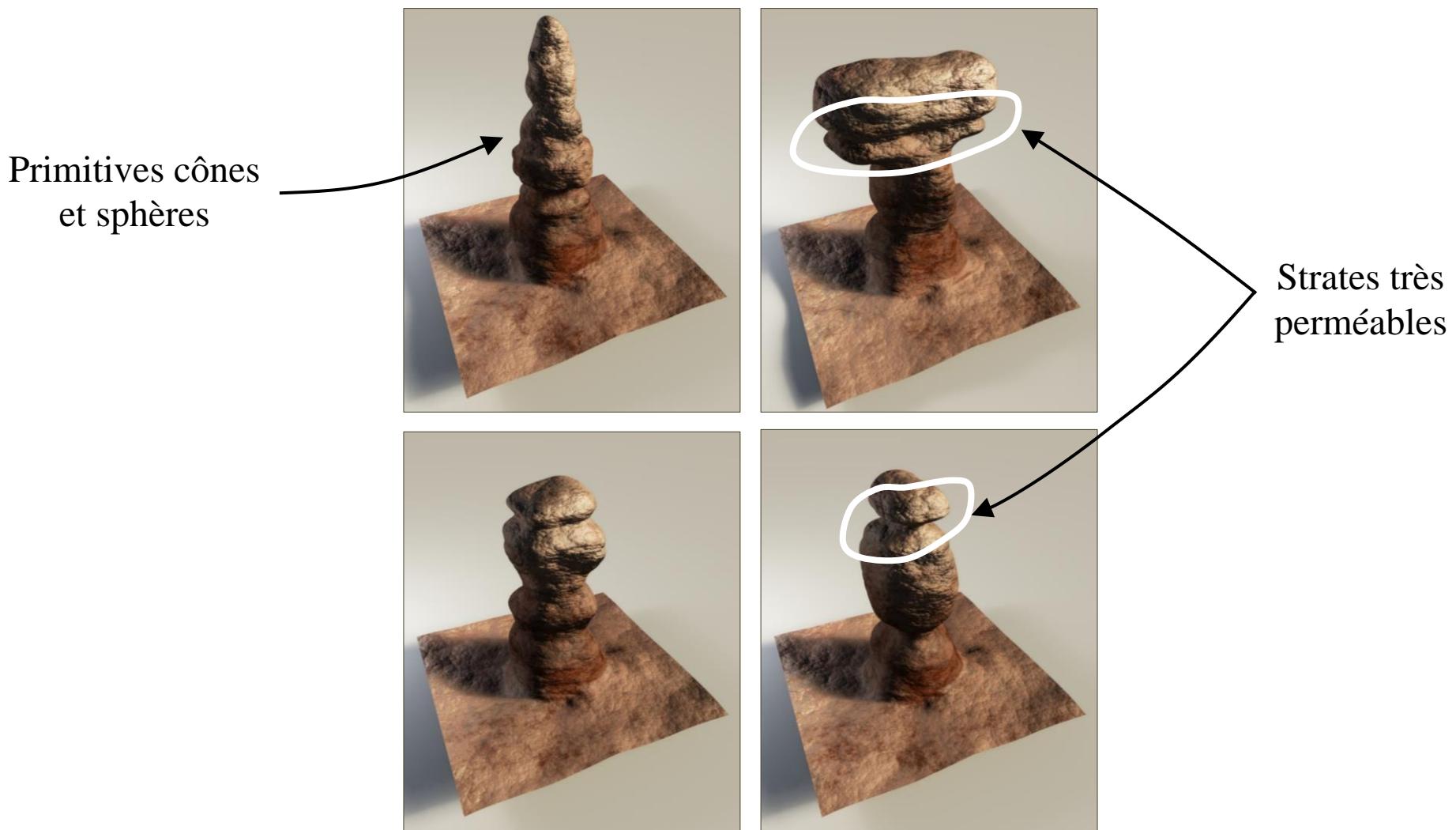
$A(p, s) \rightarrow B(p, s)$
 $B(p, s) \rightarrow b(p, s) B(p + s z, \lambda s)$
 $B(p, s) \rightarrow b(p, s) C(p + s z, \lambda s)$
 $C(p, s) \rightarrow c(p, s) B(p + s z, \lambda s)$
 $C(p, s) \rightarrow c(p, s)$
 $C(p, s) \rightarrow d(p, s)$



Règles de grammaire

Symboles terminaux

Hoodoos par grammaires de formes ouvertes

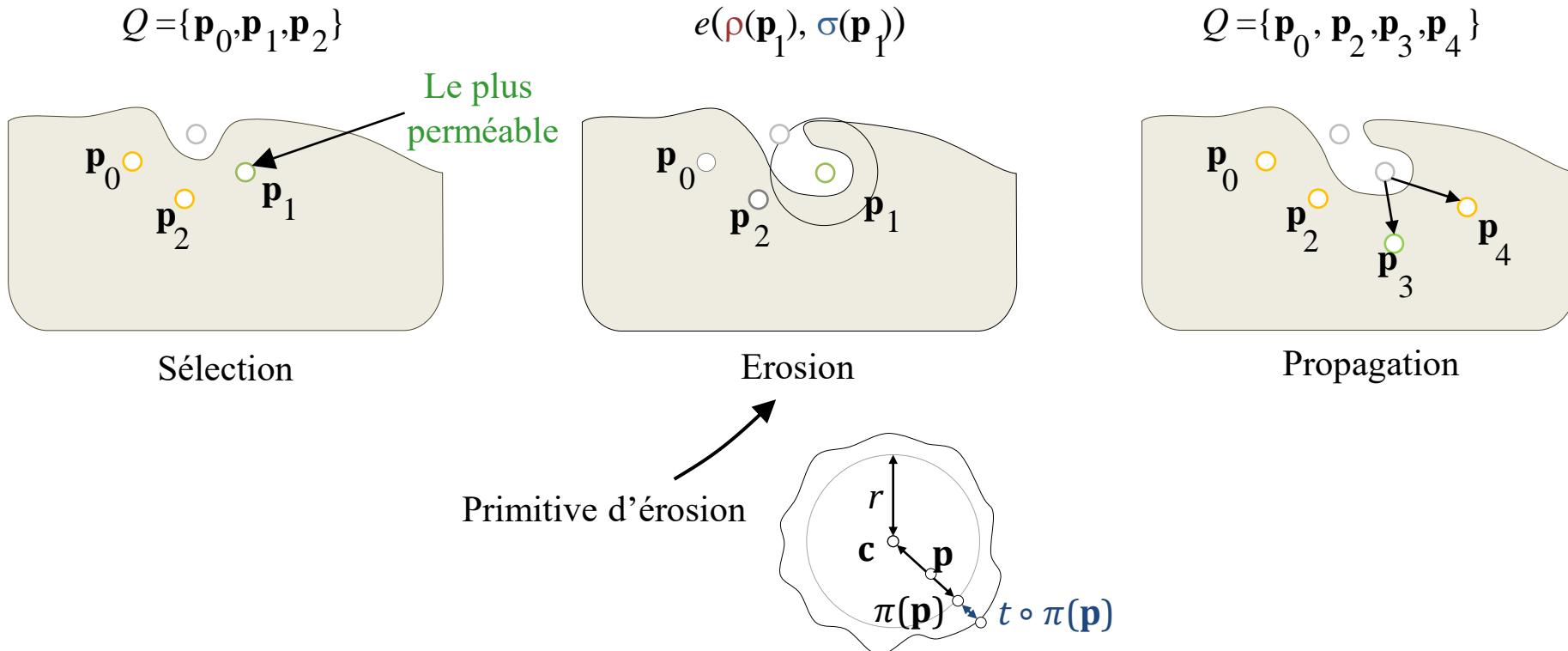


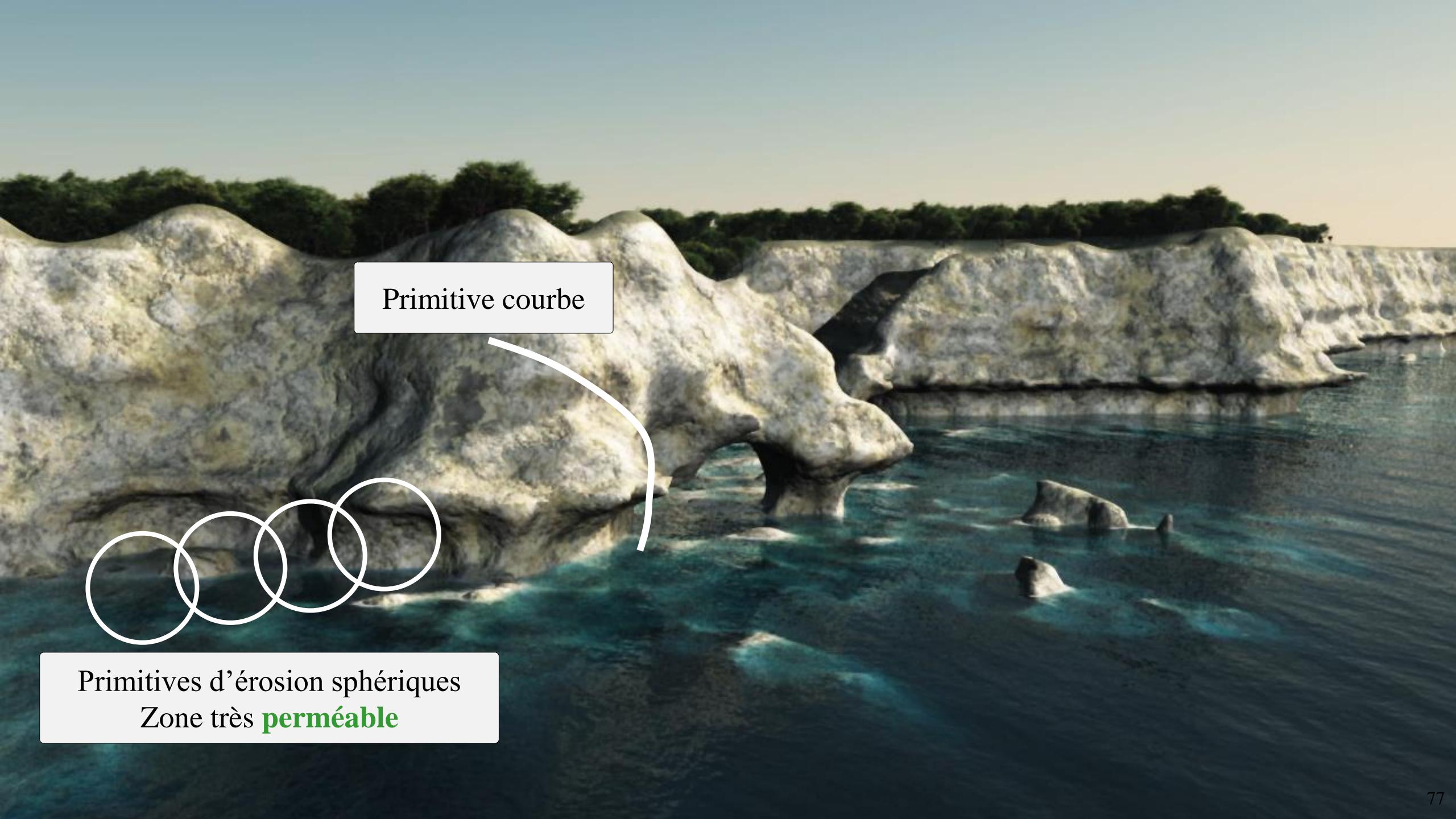
Erosion par invasion-percolation

Algorithme d'invasion-percolation

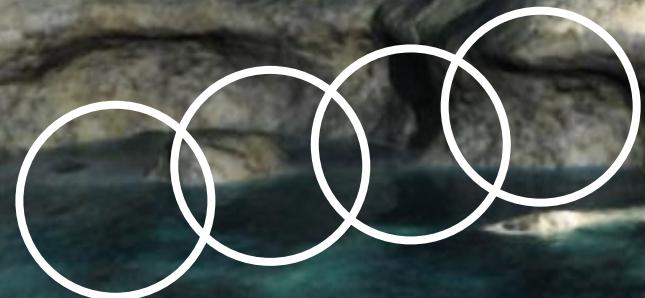
Modèle de propagation de l'eau dans les matériaux poreux

[Wilkinson 1983]

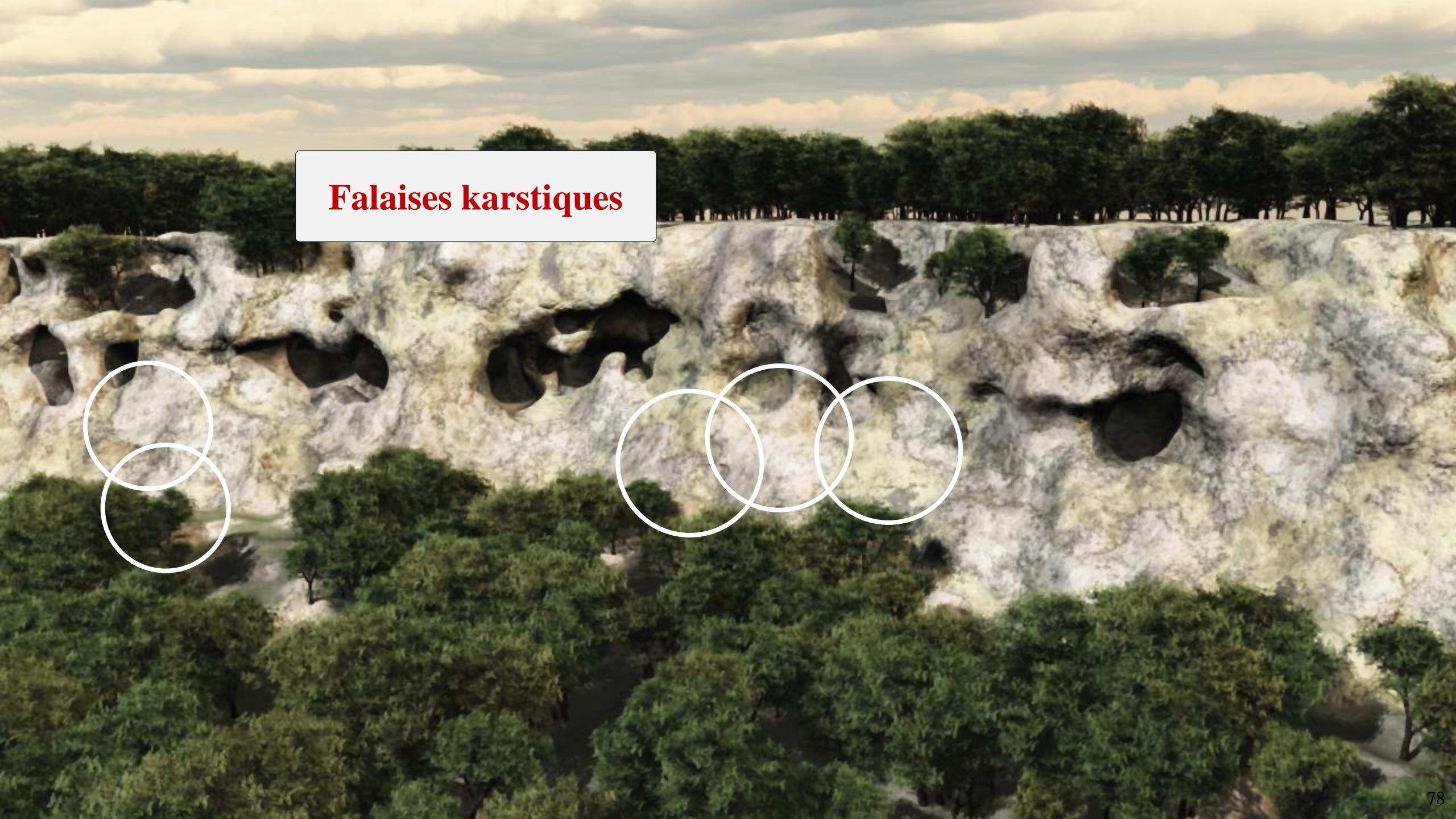




Primitive courbe



Primitives d'érosion sphériques
Zone très perméable



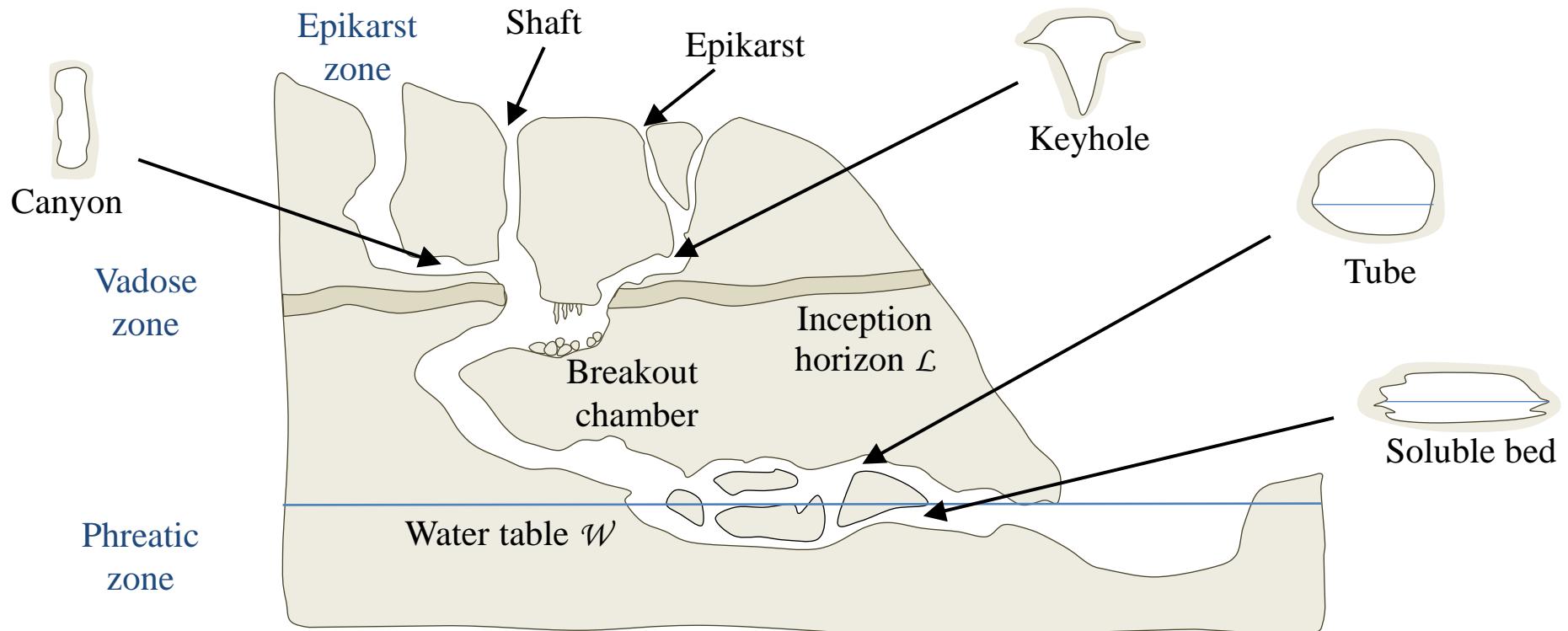
Falaises karstiques

Génération de réseaux karstiques



Génération de réseaux karstiques

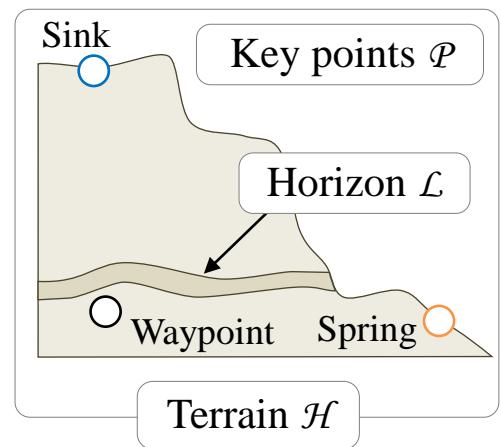
Les karsts **profonds** sont organisés en **réseaux**



Pas de travaux en informatique graphique

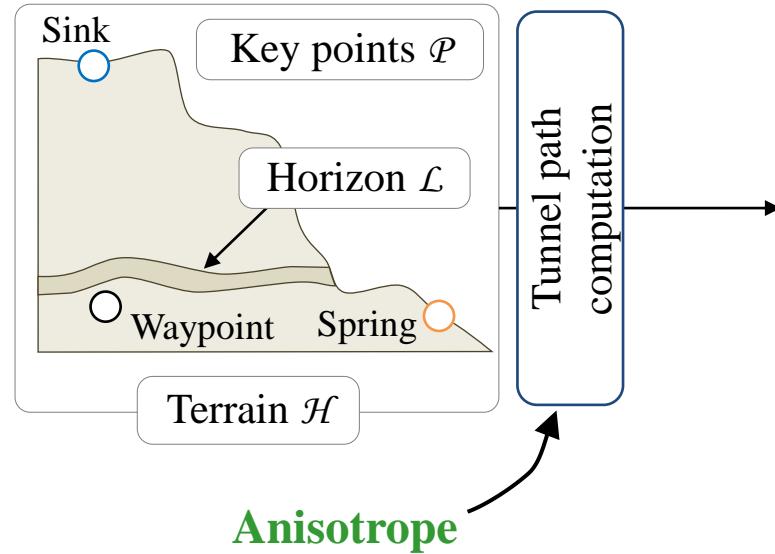
Génération de réseaux karstiques

Problème : générer des réseaux karstiques réalistes à grande échelle



Génération de réseaux karstiques

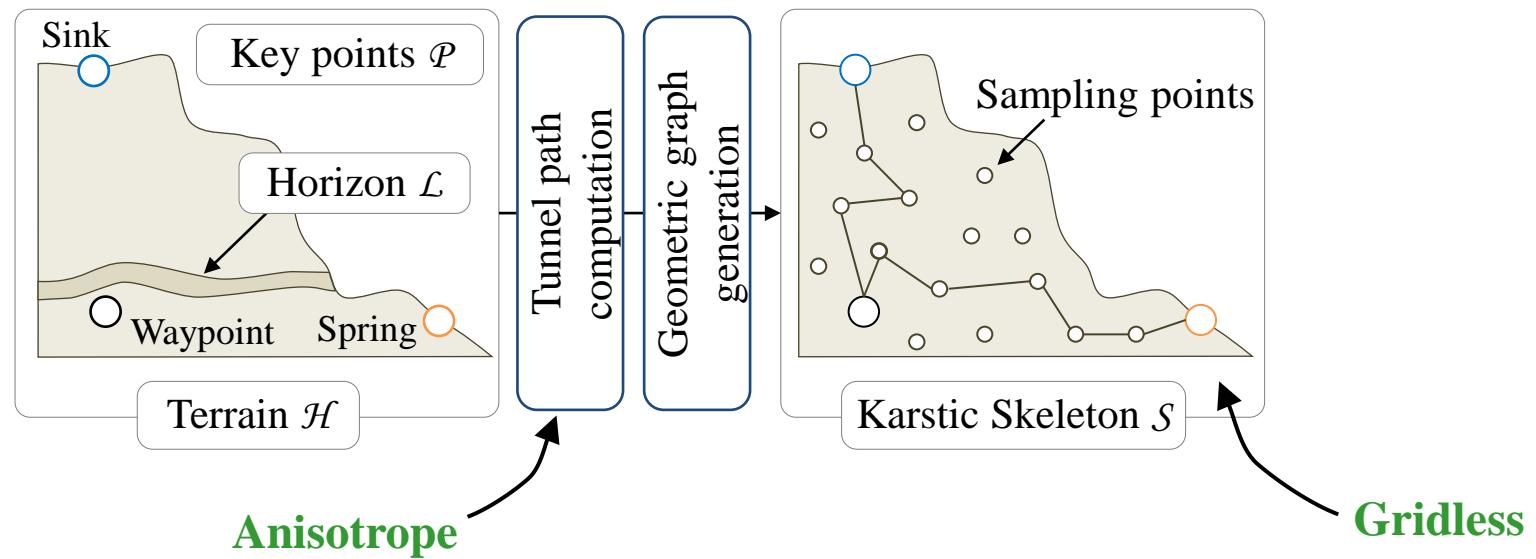
Problème : générer des réseaux karstiques réalistes à grande échelle



Algorithme de **plus court chemin anisotrope**

Génération de réseaux karstiques

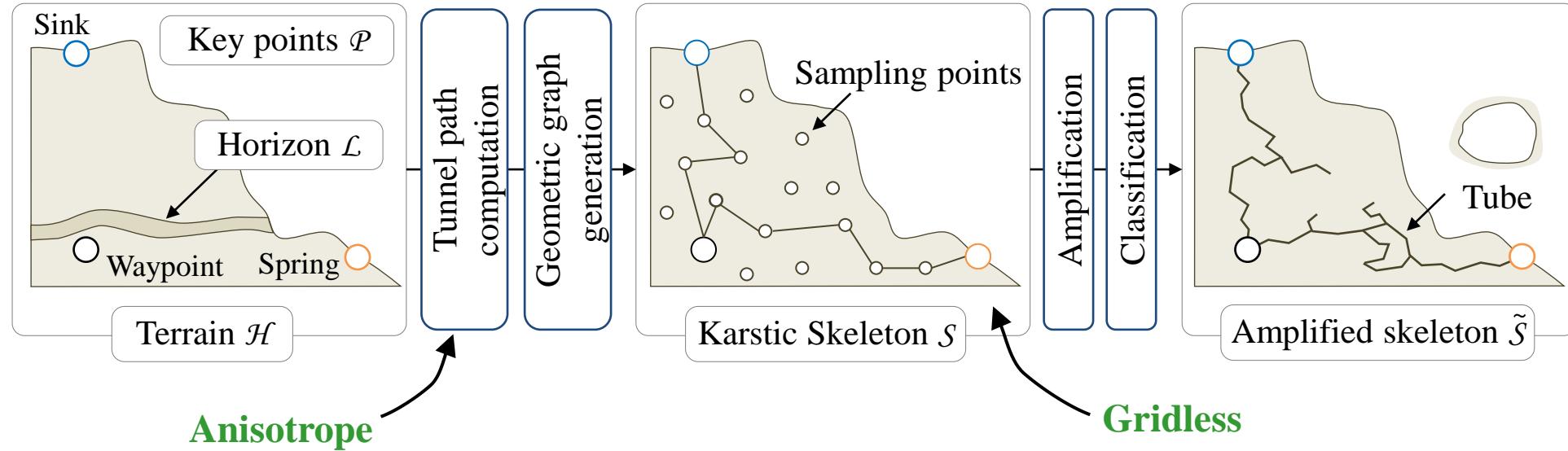
Problème : générer des réseaux karstiques réalistes à grande échelle



Algorithme de **plus court chemin anisotrope**
Génération du réseau karstique par **γ -squelette**

Génération de réseaux karstiques

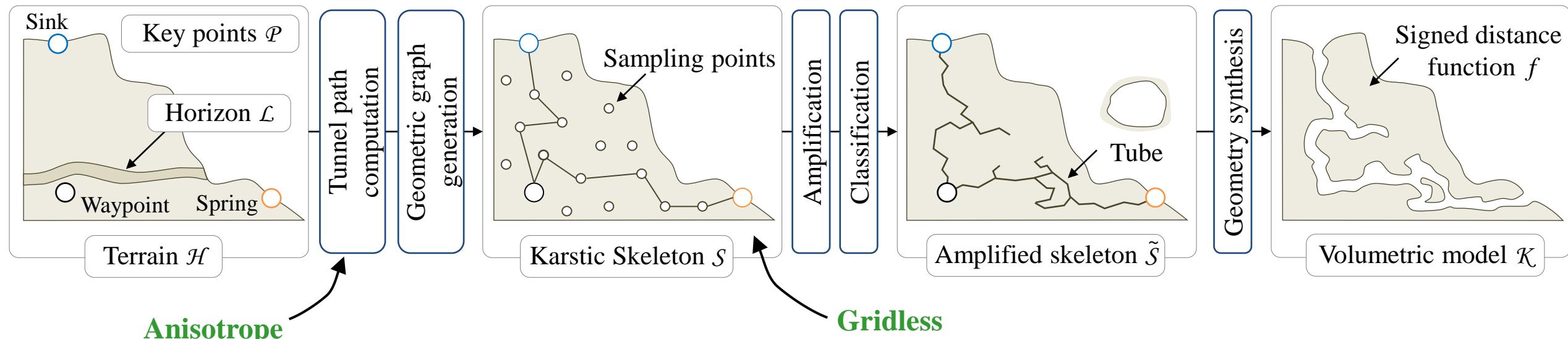
Problème : générer des réseaux karstiques réalistes à grande échelle



Algorithme de **plus court chemin anisotrope**
Génération du réseau karstique par **γ -squelette**

Génération de réseaux karstiques

Problème : générer des réseaux karstiques réalistes à grande échelle

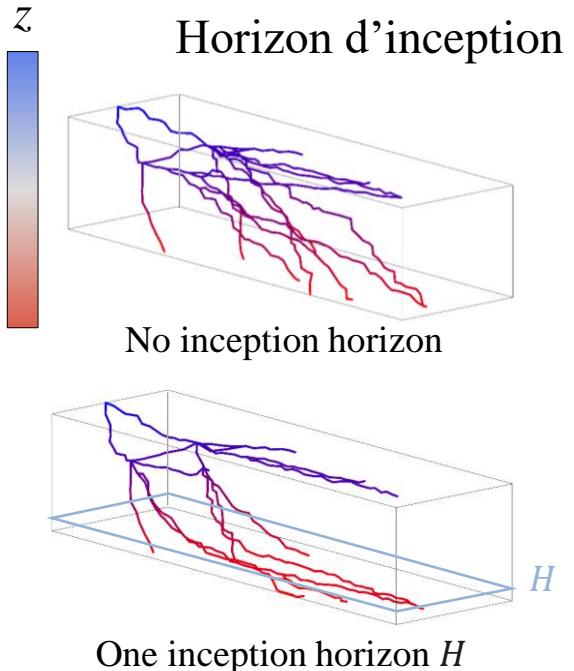


Algorithme de **plus court chemin anisotrope**
Génération du réseau karstique par **γ -squelette**
Synthèse de la géométrie avec des **SDF**

Fonction de coût géologique

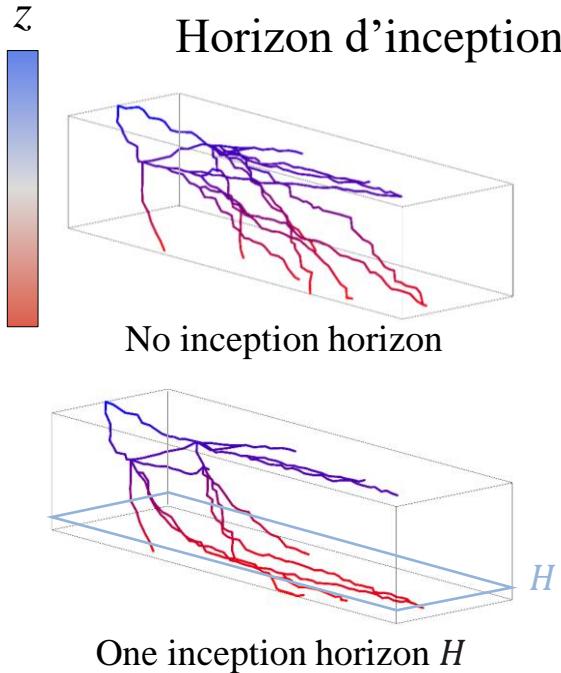
Fonction de coût basée **géologie**

$$c(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}}) = c_H(\mathbf{p}) + c_F(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}}) + c_\pi(\mathbf{p})$$



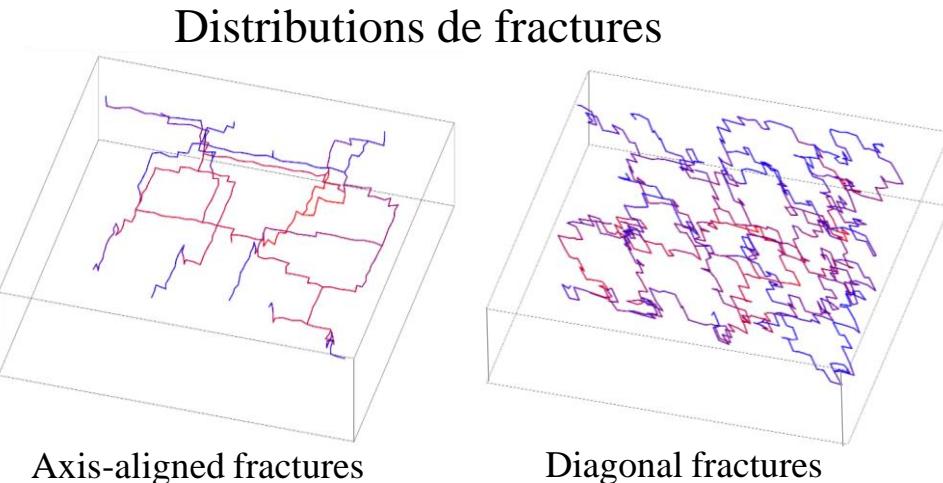
$$c_H(\mathbf{p}) = g(d(\mathbf{p}, H)/r)$$

Fonction de coût géologique



Fonction de coût basée **géologie**

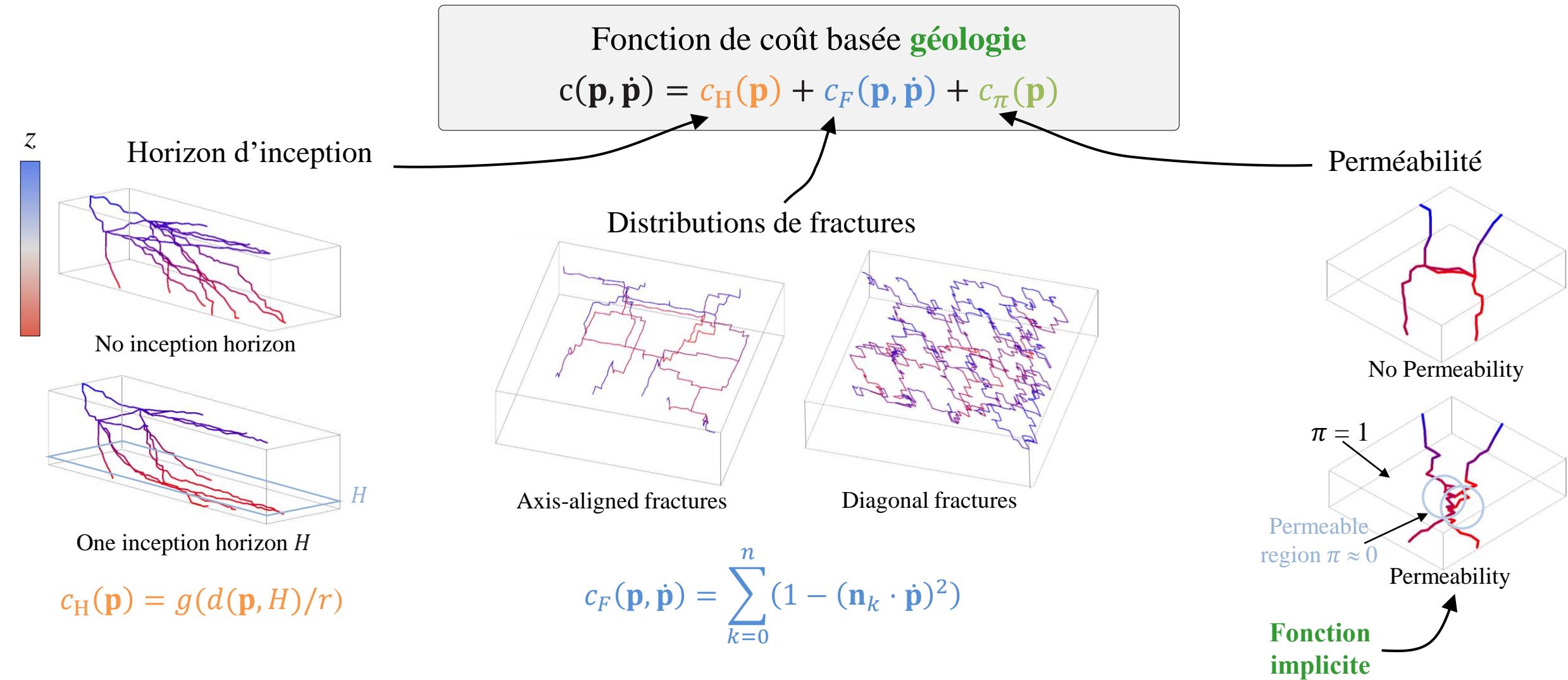
$$c(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}}) = c_H(\mathbf{p}) + c_F(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}}) + c_\pi(\mathbf{p})$$



$$c_H(\mathbf{p}) = g(d(\mathbf{p}, H)/r)$$

$$c_F(\mathbf{p}, \dot{\mathbf{p}}) = \sum_{k=0}^n (1 - (\mathbf{n}_k \cdot \dot{\mathbf{p}})^2)$$

Fonction de coût géologique

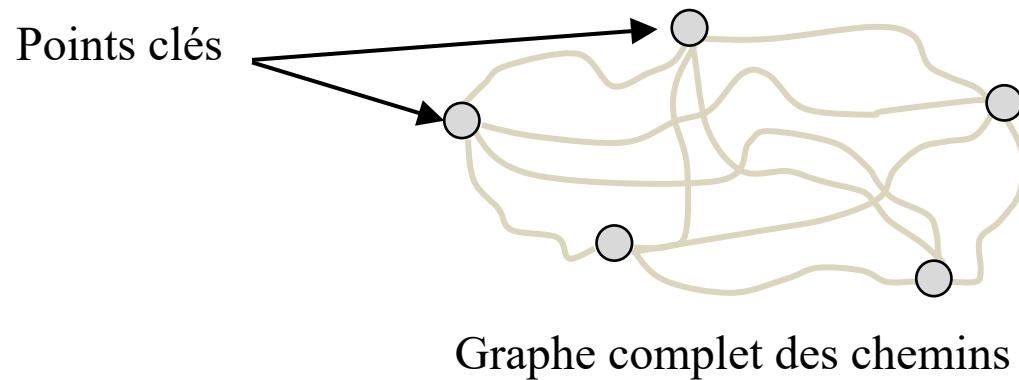


Génération de réseaux karstiques

Objectif : calculer le **squelette karstique S** à partir des points clés **P**, avec une métrique anisotrope

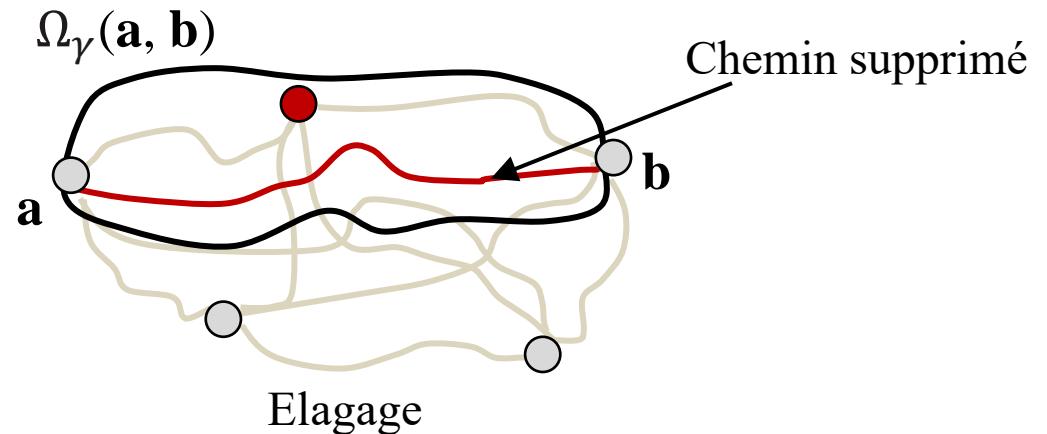
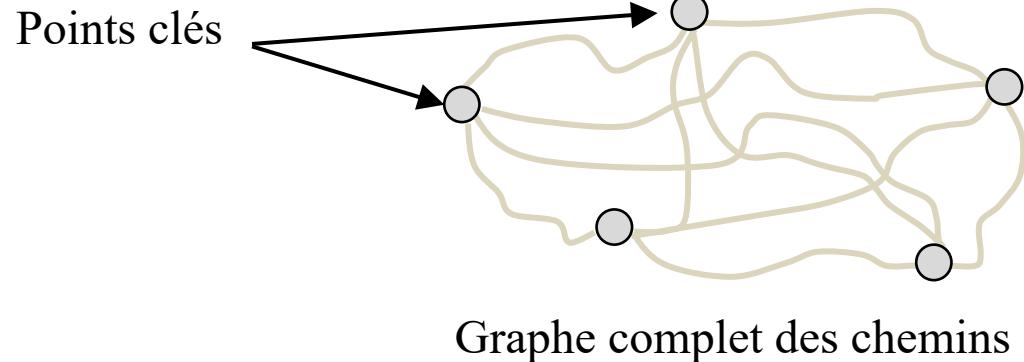
Génération de réseaux karstiques

Objectif : calculer le **squelette karstique S** à partir des points clés **P**, avec une métrique anisotrope



Génération de réseaux karstiques

Objectif : calculer le **squelette karstique** S à partir des points clés P , avec une métrique anisotrope



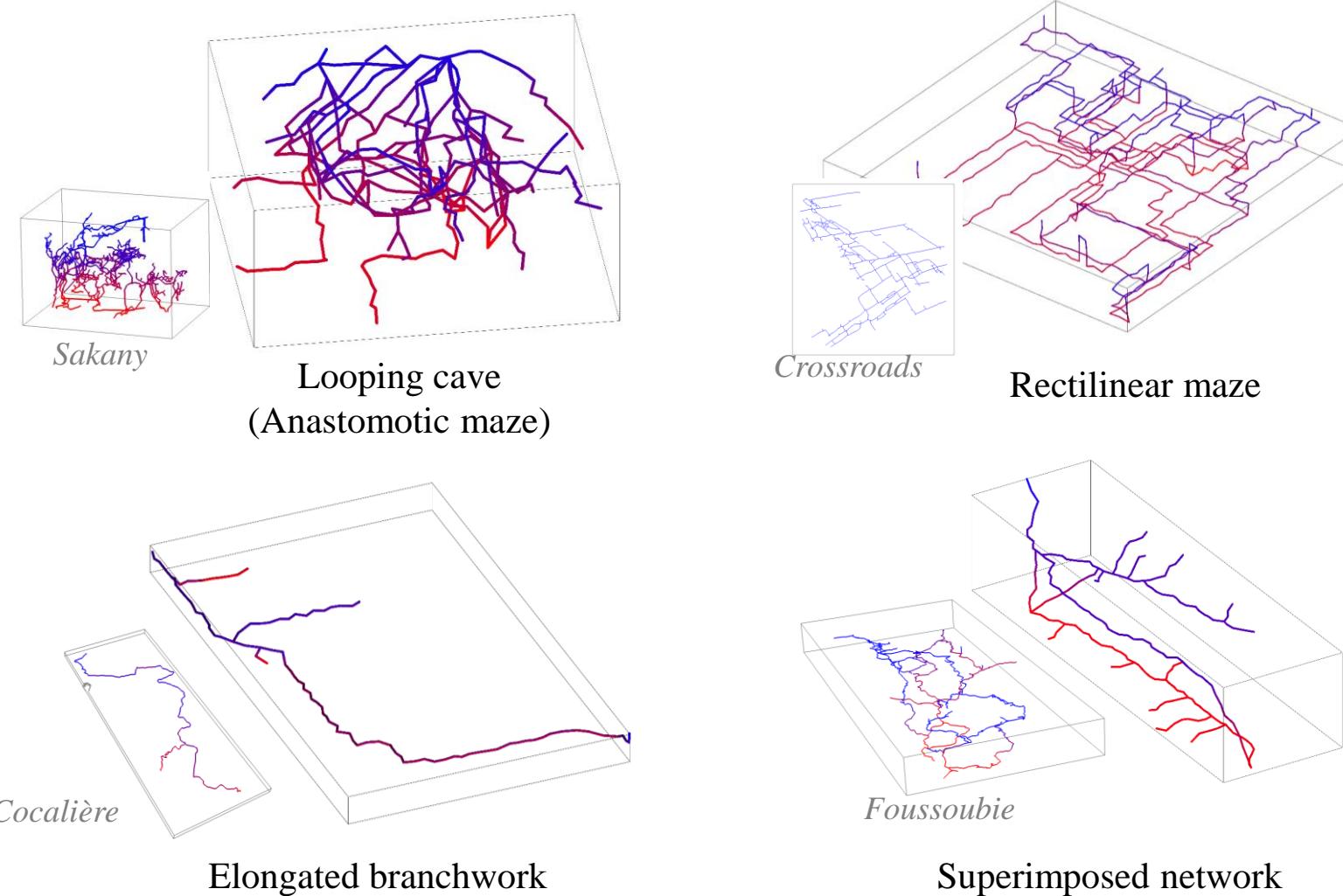
Soient a et b deux points dans P , on définit le voisinage $\Omega_\gamma(a, b)$:

$$\Omega_\gamma(a, b) = \{ \forall p \in \Omega, d(a, b)^g < d(a, p)^g + d(p, b)^g \}$$

(a, b) forme un chemin dans le graphe ssi $\Omega_\gamma(a, b) \cap P = \emptyset$

Points clés

Variété de réseaux karstiques



Synthèse de la géométrie des tunnels

Problème : synthèse de la géométrie détaillée des tunnels

Primitive implicite pour une **courbe 3D** avec des **profils asymétriques**

Synthèse de la géométrie des tunnels

Problème : synthèse de la géométrie détaillée des tunnels

Primitive implicite pour une **courbe 3D** avec des **profils asymétriques**

**Problème de
discontinuité**



Synthèse de la géométrie des tunnels

Problème de
discontinuité

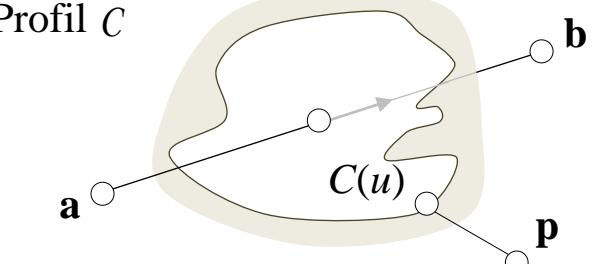
Problème : synthèse de la géométrie détaillée des tunnels

Primitive implicite pour une **courbe 3D** avec des **profils asymétriques**

Stratégie de **primitives par balayage** ou par **union de sphères**

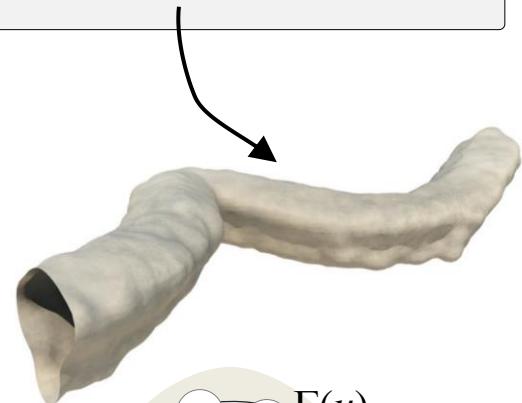


Profil C

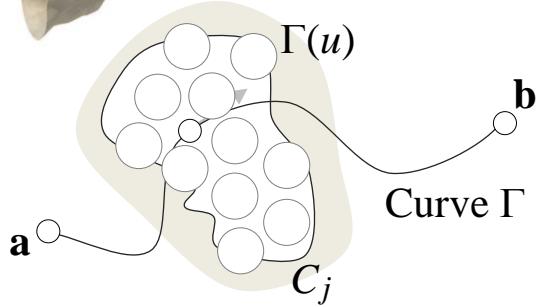


Distance au profil C

$$f(\mathbf{p}) = d(\mathbf{p}, C) \delta(\mathbf{p}, C)$$



$\Gamma(u)$



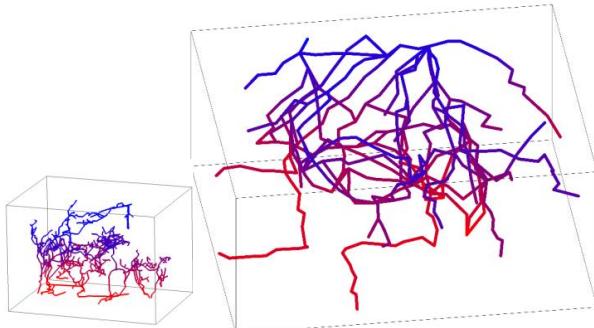
Union des sphères S_i

$$f(\mathbf{p}) = \min_{i=0}^n d(\mathbf{p}, S_i)$$

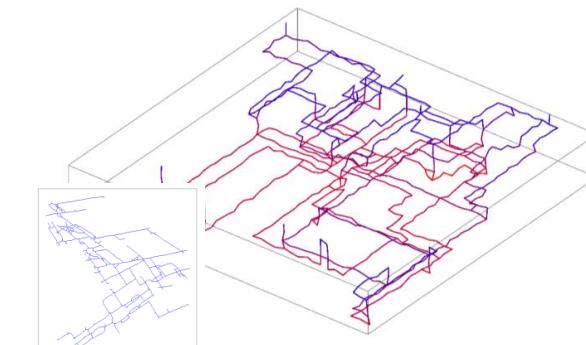




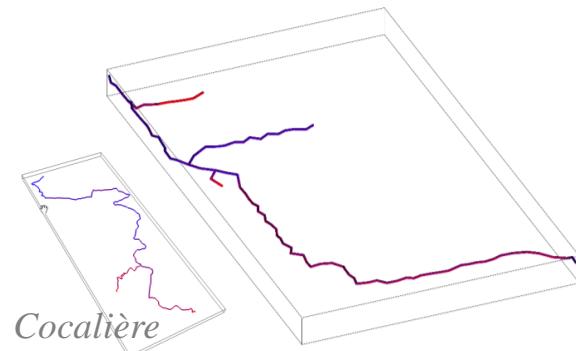
Validation et comparaison



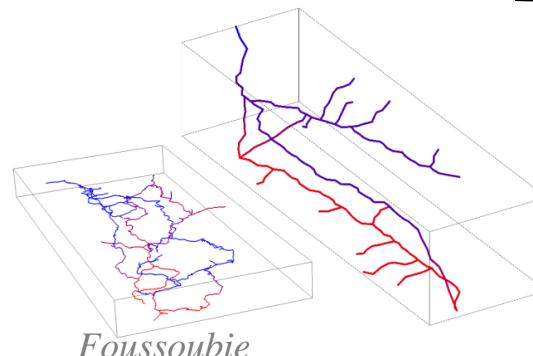
Sakany
Looping cave
(Anastomotic maze)



Crossroads
Rectilinear maze



Cocalière
Elongated branchwork

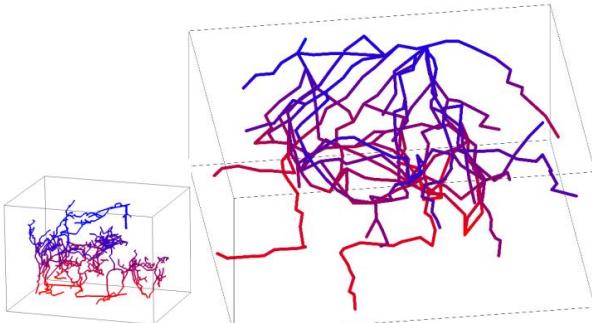


Foussoubie
Superimposed network

Comparaison avec des réseaux karstiques réels [Collon 2017]

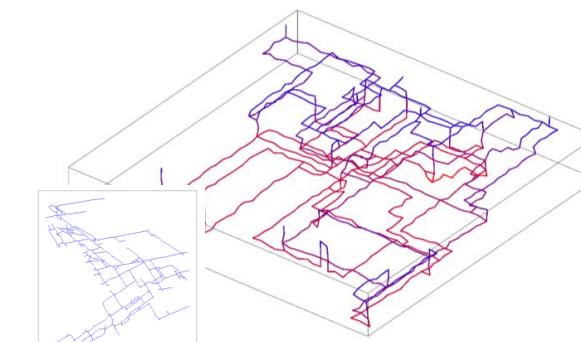
Karstic system	\bar{l}	H_O	\bar{k}	r_k	\overline{SPL}	CPD
Branchwork	96	0.9	2.0	-0.4	4.1	0.6
Looping cave	79	0.9	3.2	0.04	5.0	0.2
Rectilinear maze	121	0.6	3.0	0.0	5.6	0.1
Superimposed net	101	0.8	2.1	-0.3	4.9	0.4
Observed range	8 - 331	0.8 - 1.0	1.8 - 2.6	-0.6 - -0.2	2.3 - 55.7	0.0 - 0.6

Validation et comparaison



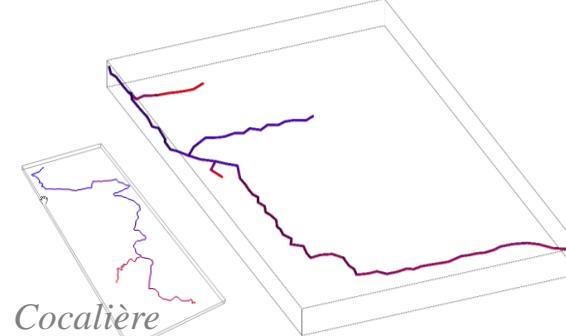
Sakany

Looping cave
(Anastomotic maze)



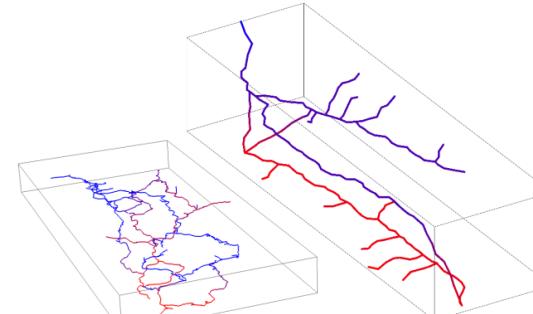
Crossroads

Rectilinear maze



Cocalière

Elongated branchwork



Foussoubie

Superimposed network

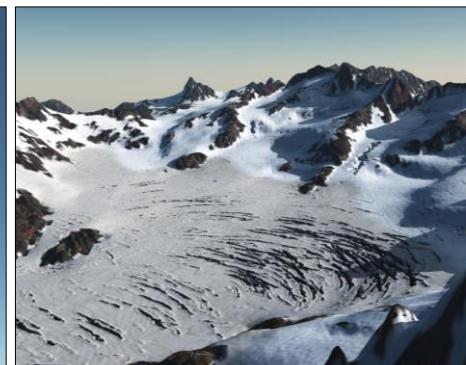
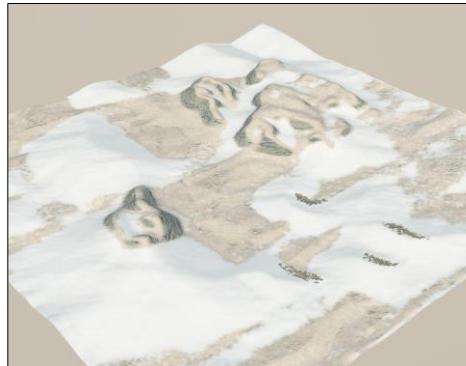
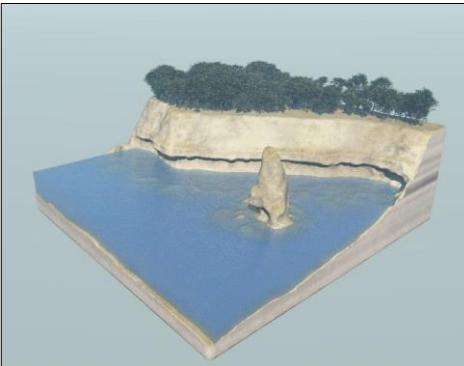
Comparaison avec des réseaux karstiques réels [Collon 2017]

Karstic system	\bar{l}	H_O	\bar{k}	r_k	\overline{SPL}	CPD
Branchwork	96	0.9	2.0	-0.4	4.1	0.6
Looping cave	79	0.9	3.2	0.04	5.0	0.2
Rectilinear maze	121	0.6	3.0	0.0	5.6	0.1
Superimposed net	101	0.8	2.1	-0.3	4.9	0.4
Observed range	8 - 331	0.8 - 1.0	1.8 - 2.6	-0.6 - -0.2	2.3 - 55.7	0.0 - 0.6

Comparaison avec [Franke 2022]

Grille de voxels
Temps de calcul
Très petites scènes (50m)

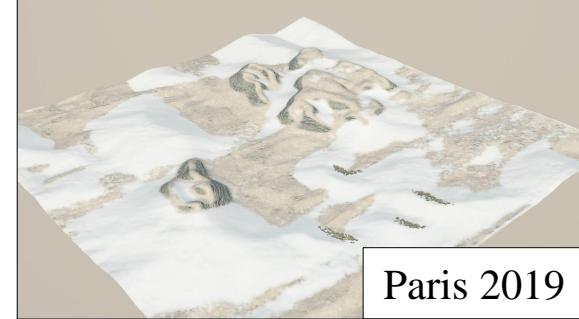
Conclusion



Conclusion

I)

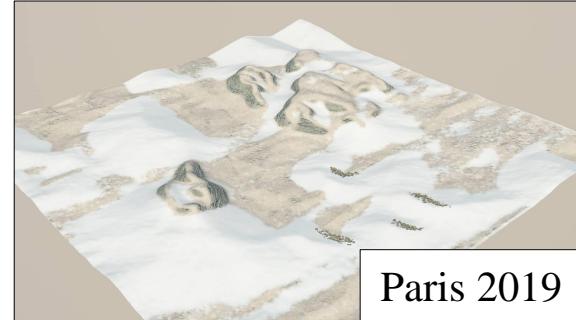
Interface entre **Informatique Graphique** et **Géomorphologie**



Conclusion

I)

Interface entre **Informatique Graphique** et **Géomorphologie**



II)

Modélisation implicite pour les terrains **volumiques**



Perspectives de recherche

Simulation de **phénomènes macro-échelle** de terrains



Rivières en tresses



Simulation sur grille [Murray 1994]
Equation shallow-water [Sun 2015]

Perspectives de recherche

Simulation de phénomènes macro-échelle de terrains



Rivières en tresses



Côtes



Simulation sur grille [Murray 1994]
Equation shallow-water [Sun 2015]



Simulation [Van den Berg 2012]

Perspectives de recherche

Simulation de **phénomènes macro-échelle** de terrains



Rivières en tresses



Côtes



Delta



Simulation sur grille [Murray 1994]
Equation shallow-water [Sun 2015]



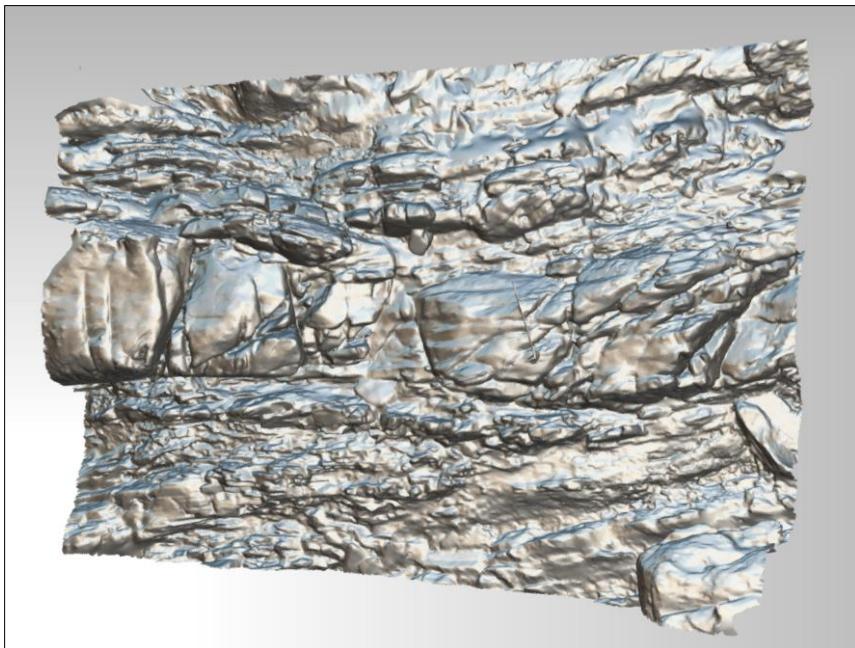
Simulation [Van den Berg 2012]



Approche phénoménologique
[Herrmann 2009]

Perspectives de recherche

Objectif : étendre le modèle implicite avec des formes volumiques depuis des **données réelles**



Scan LiDAR

Primitive implicite

Surface de convolution
[Peytavie 2009]

Modèle d'apprentissage
[Mildenhall 2020]
[Sitzmann 2020]

Modélisation et simulation de terrains virtuels

Axel Paris

Encadré par Éric Galin & Éric Guérin



Mardi 21 mars 2023



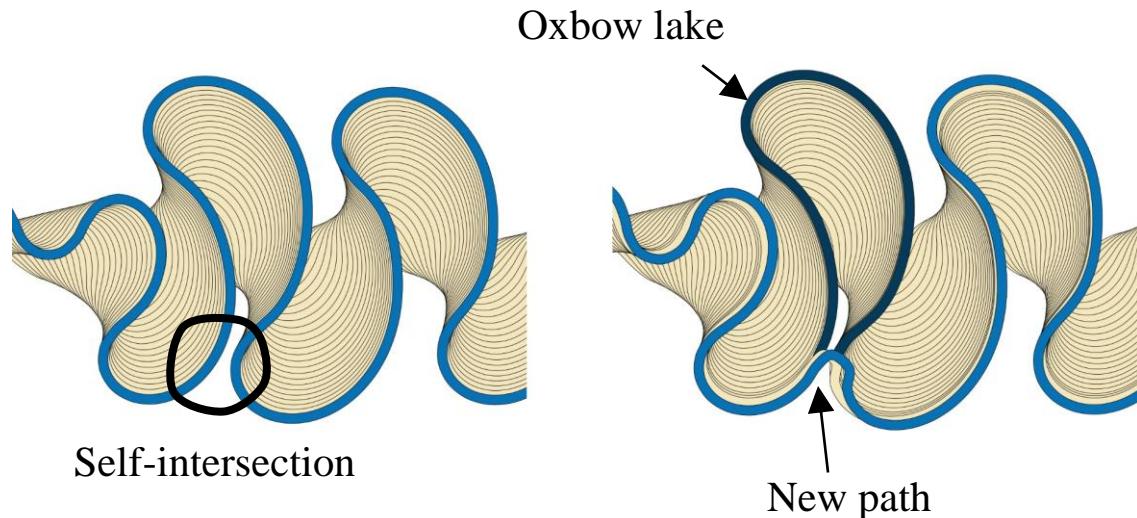
Bonus slides

Méandres: évènements ponctuels

Cutoff

Auto-intersection d'un bras de rivière

Processus **fondamental** pour la formation de méandres

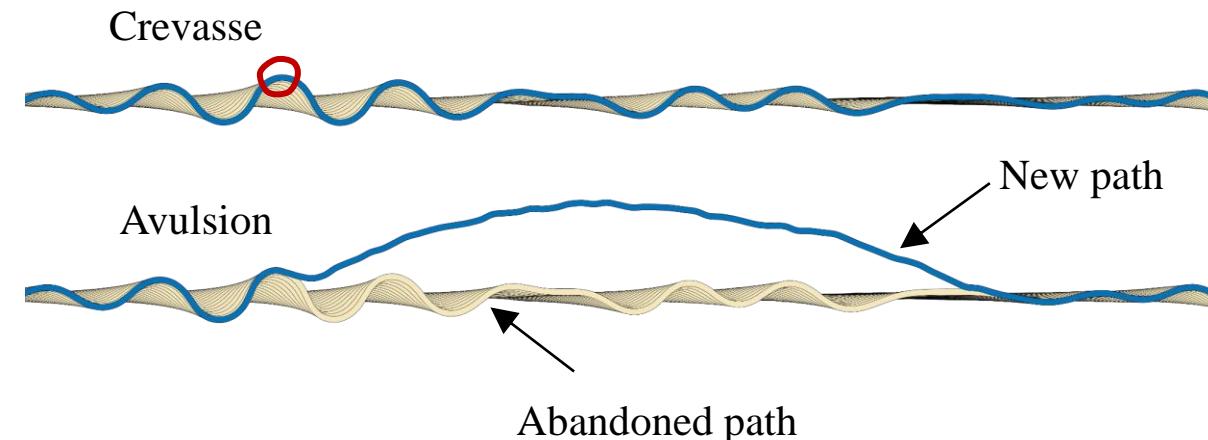


Automatique

Avulsion

Changement de trajectoire drastique et soudain

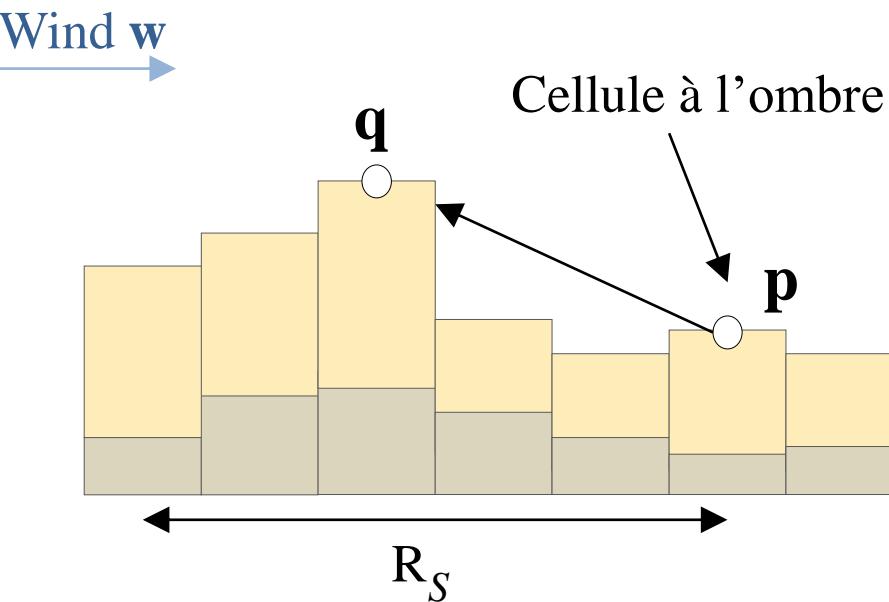
Abandon **complet** de l'ancienne trajectoire



Déclenchés par l'utilisateur ou stochastiquement

Déserts : phénomène d'ombrage du vent

Processus **essentiel** pour la formation des dunes
Angle d'ombrage du vent 15°

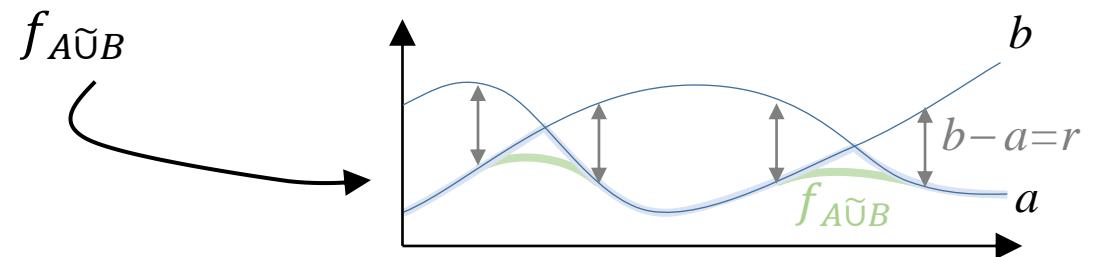
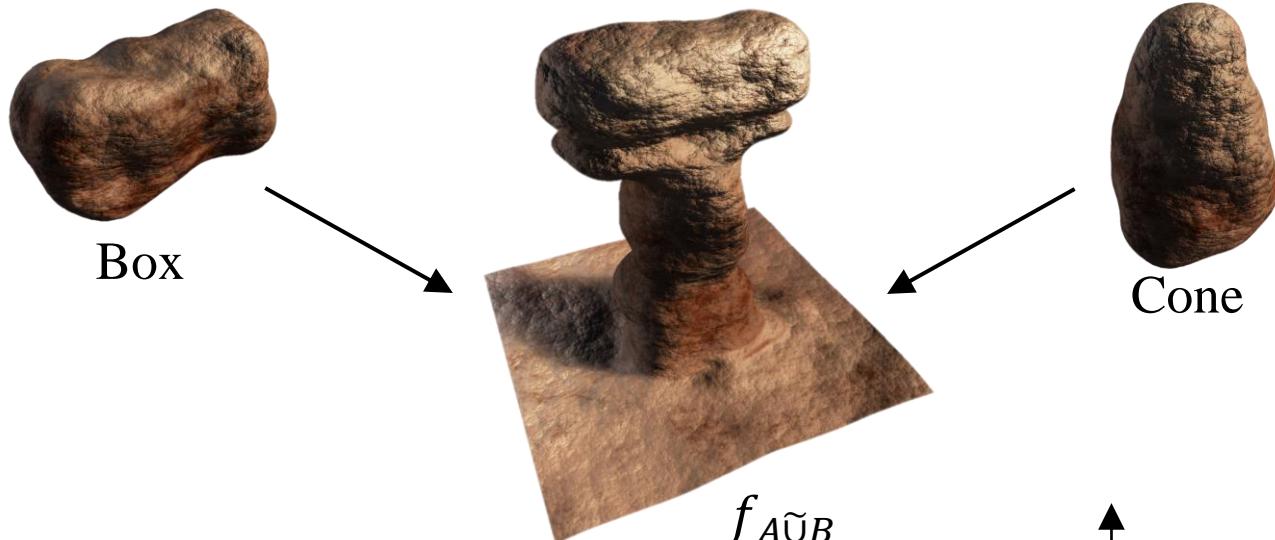


Modélisation implicite : opérateur d'union lisse

1-Lipschitz
Continuité C^1

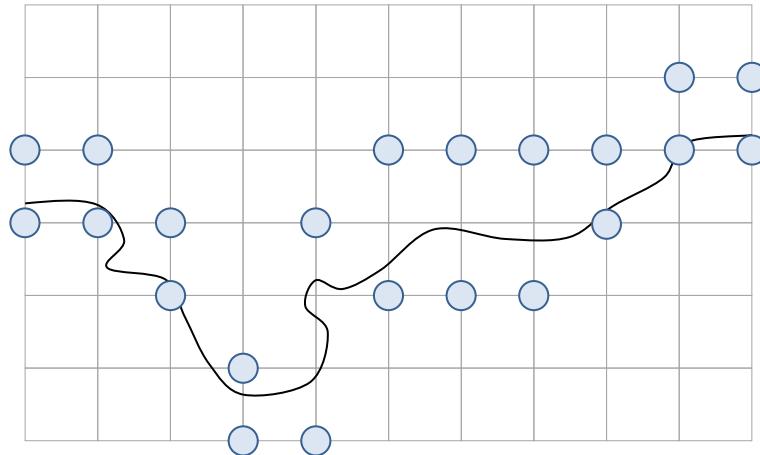
Raccordement **lisse** contrôlé par un rayon r

$$f_{A \tilde{\cup} B} = \min(a, b) - g(a, b) \quad g(a, b) = rk(a, b)^3 / 6$$

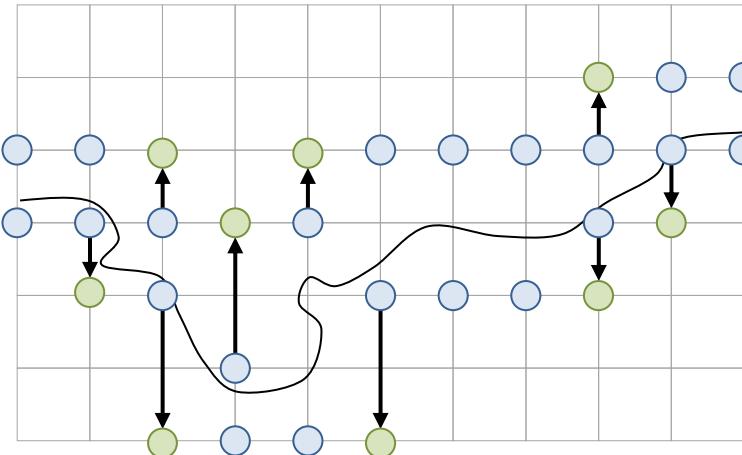


Modélisation implicite : meshing de terrains

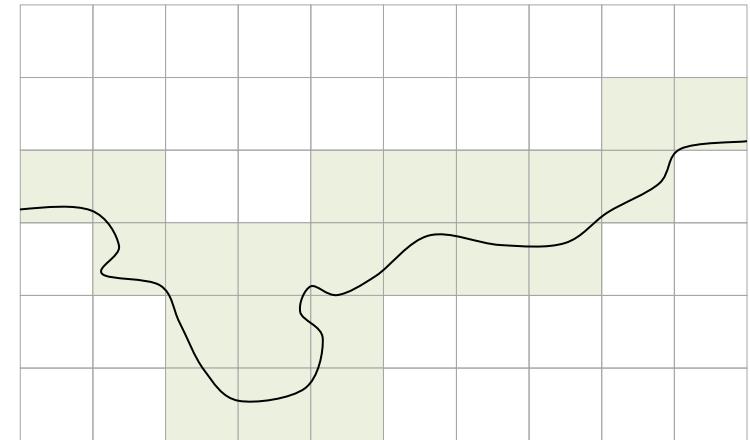
Nos reliefs 3D sont **sparses**
Grille de meshing **élaguée**



Bounds \bar{z}



Extended bounds \tilde{z}

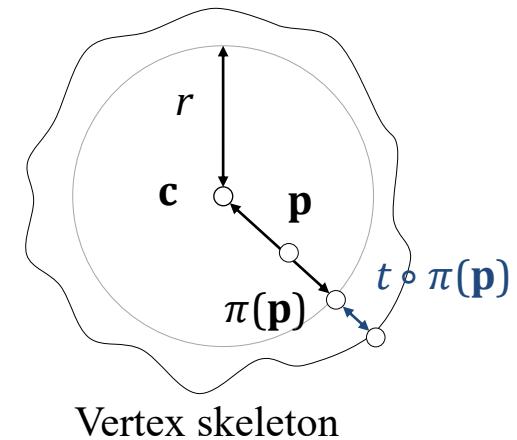
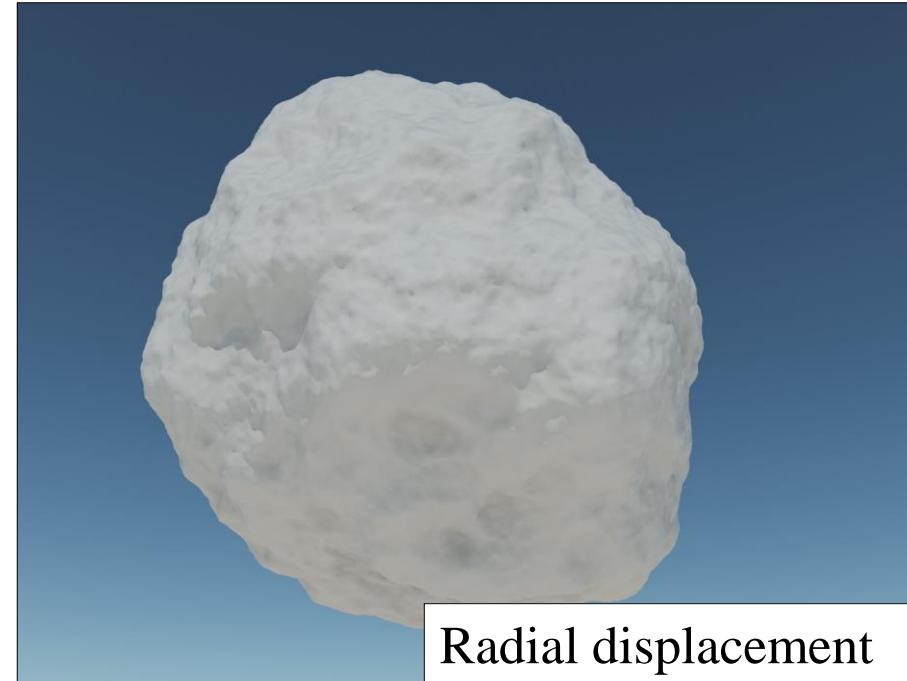
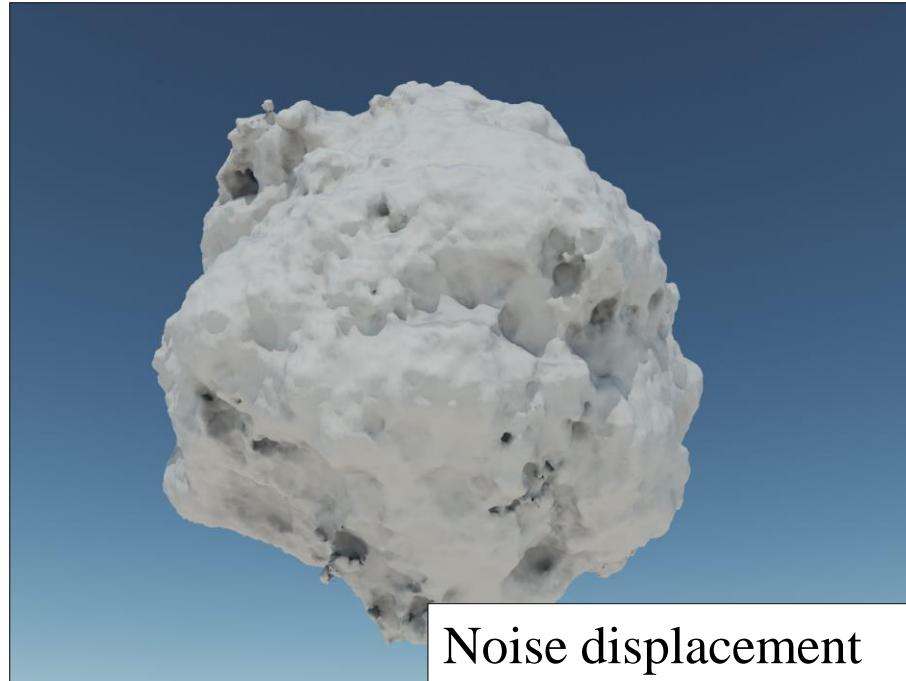


Effective Grid

Modélisation implicite : primitives à squelette détaillées

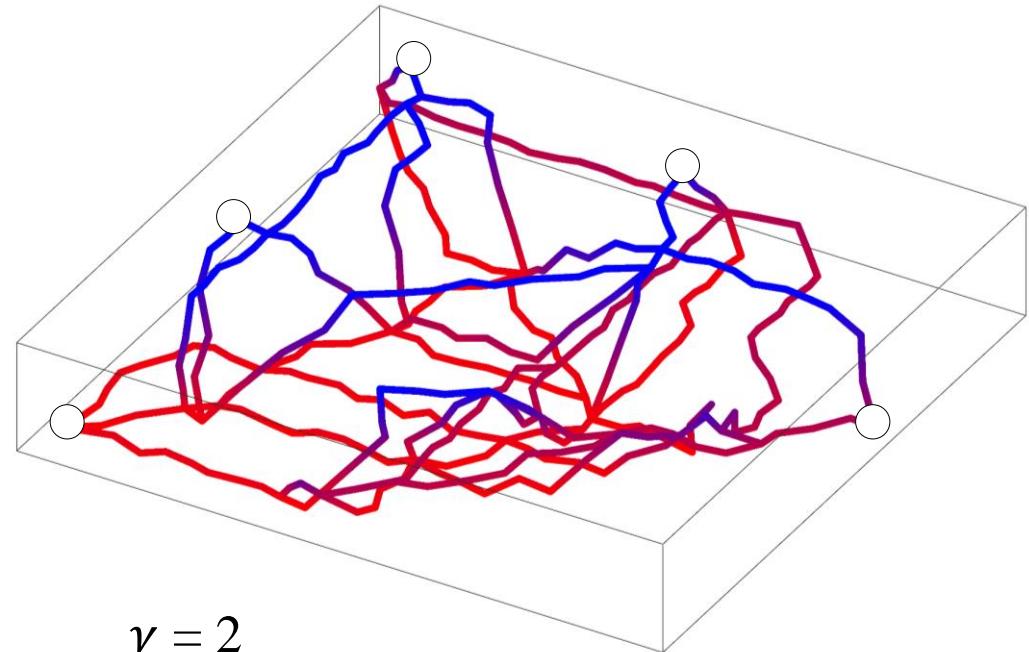
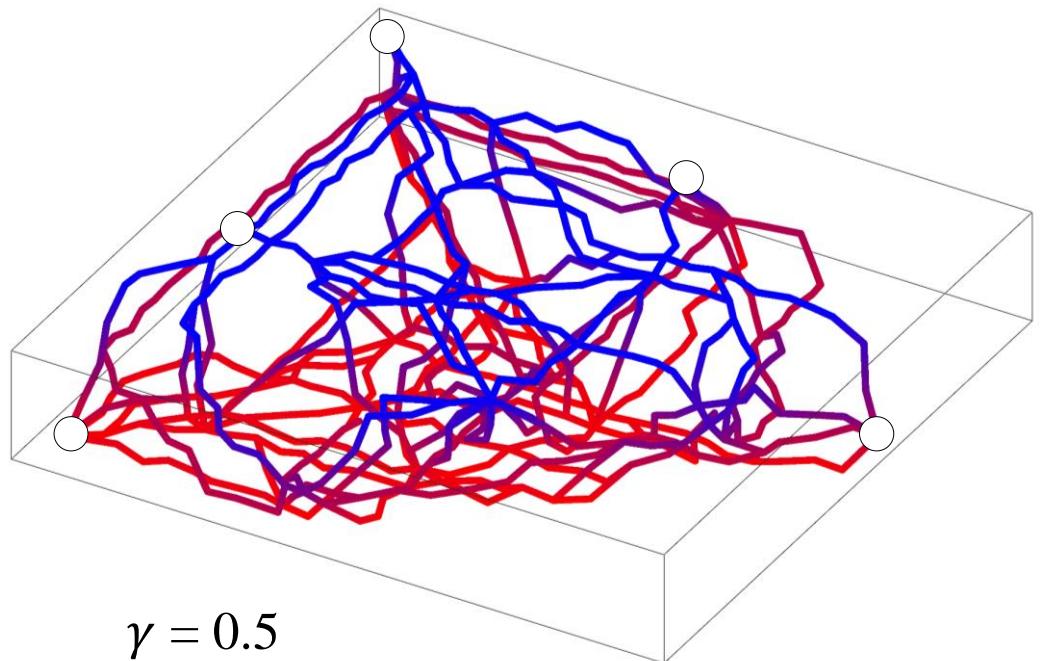
Problème : **bulles d'intensité flottantes** si on ajoute du bruit

Solution : Calculer le bruit à la **surface du squelette** et modifier le **rayon**



Karsts : génération du réseau par γ -squelettes

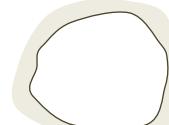
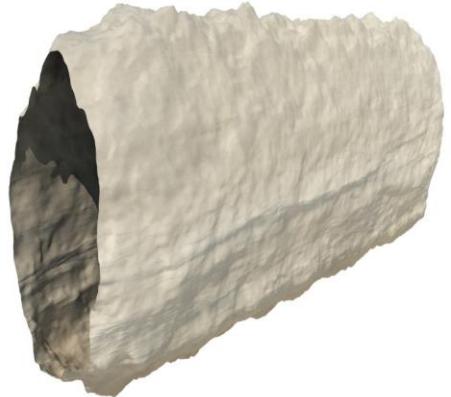
Le paramètre γ contrôle la taille du voisinage entre deux points (**a**, **b**)



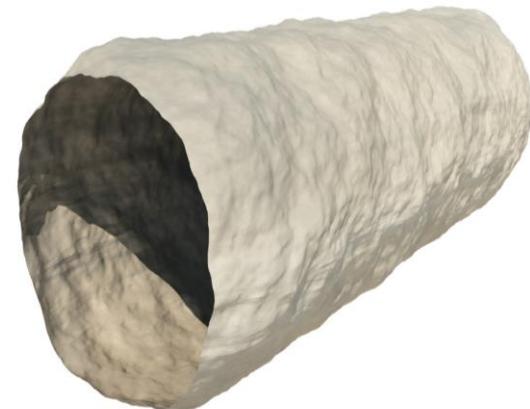
Karsts : primitives de tunnel



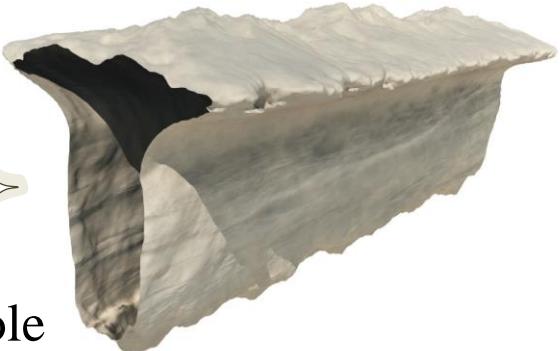
Canyon



Tube



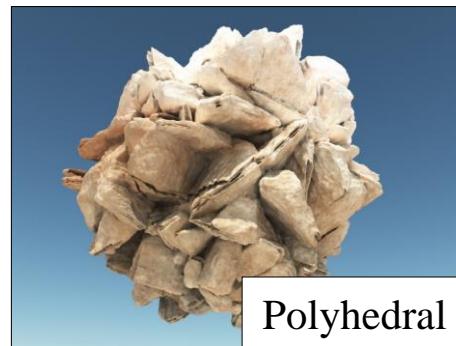
Keyhole



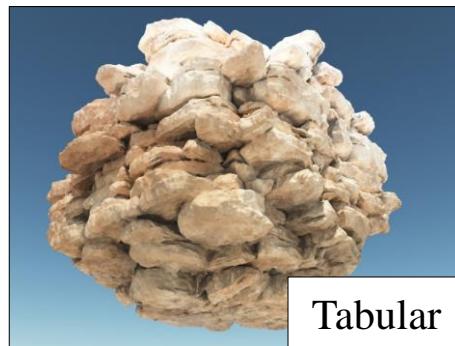
Bed



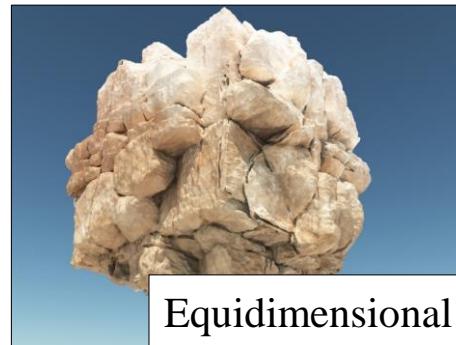
Reliefs de falaise



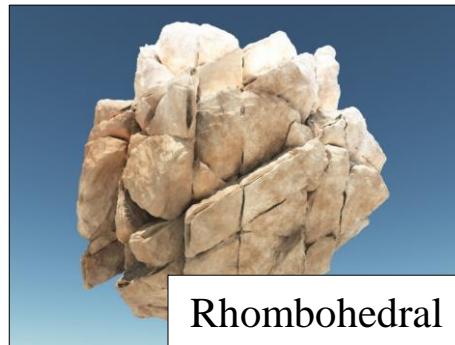
Polyhedral



Tabular

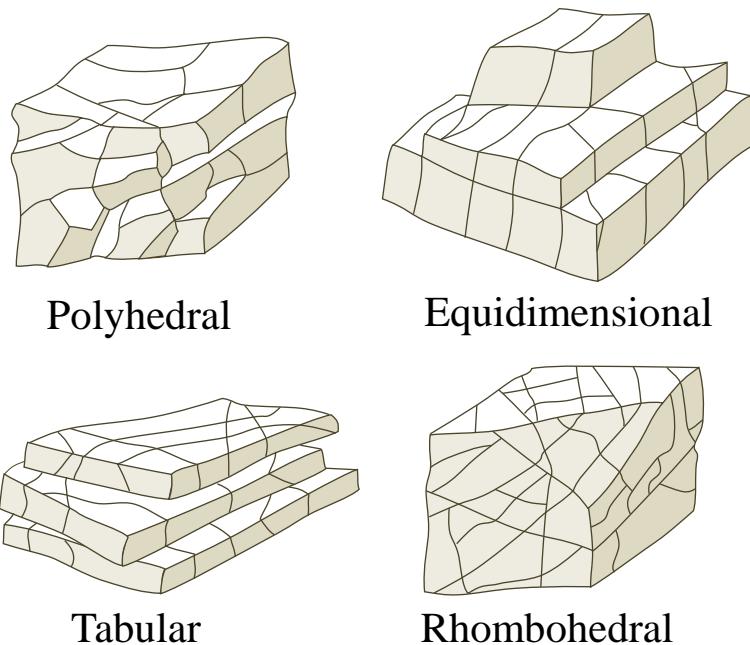


Equidimensional



Rhombohedral

Reliefs de falaise



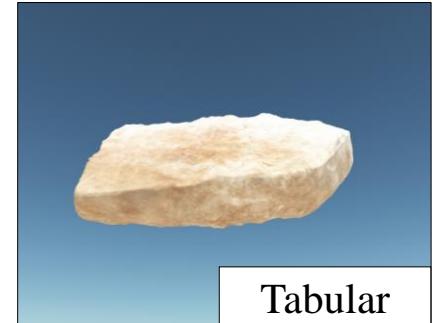
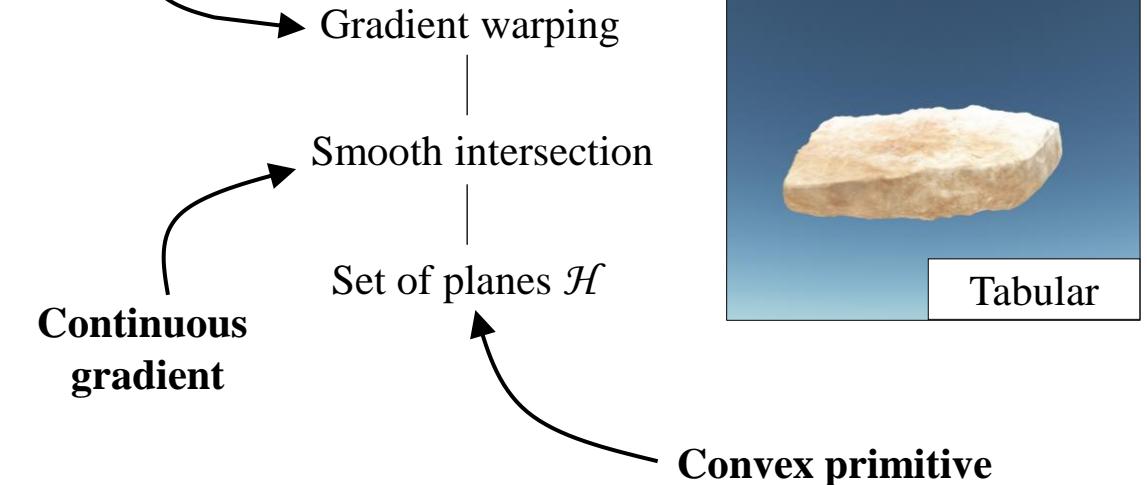
Classification de **Géomorphologie**
[Palmstrom 2001]

Problème

Ajouter des **détails volumiques** sur les **parties verticales**

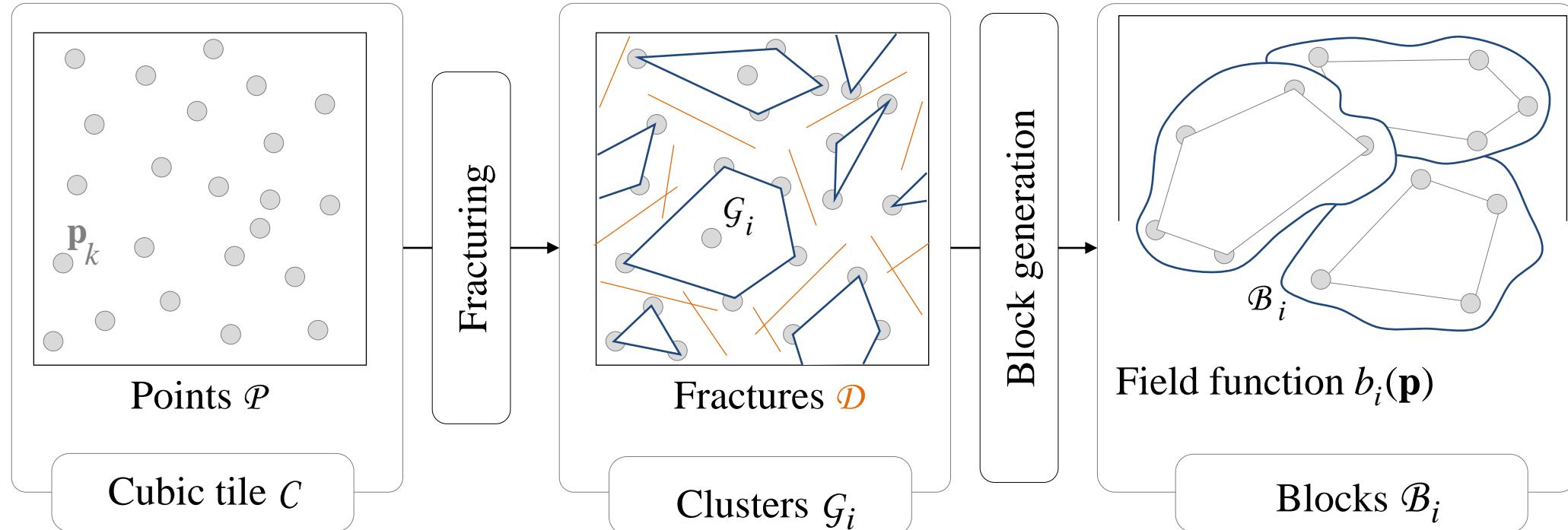
On s'intéresse
aux formes très
structurées

**Detail enhancement
operator**

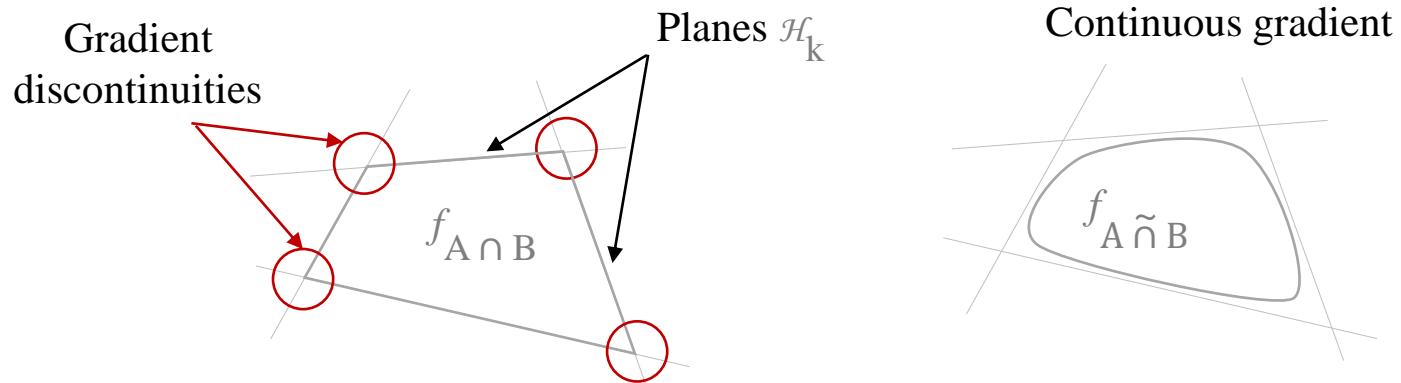


Modélisation implicite

Reliefs de falaise : processus de fracturation



Reliefs de falaise : opérateur de déformation basé gradient

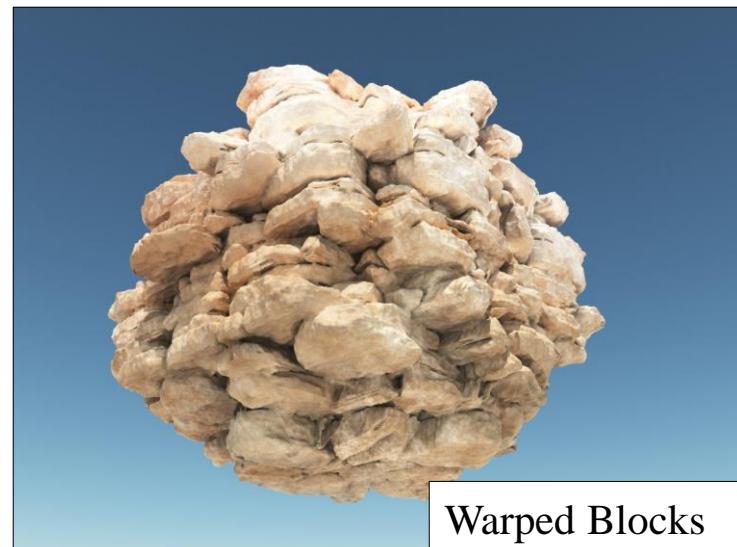


Intersection

Smooth intersection



Blocks



Warped Blocks

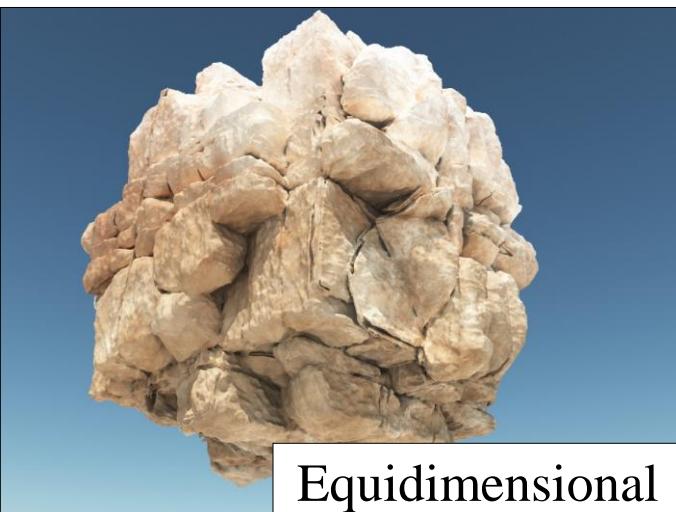
Reliefs de falaise : variété géologiques



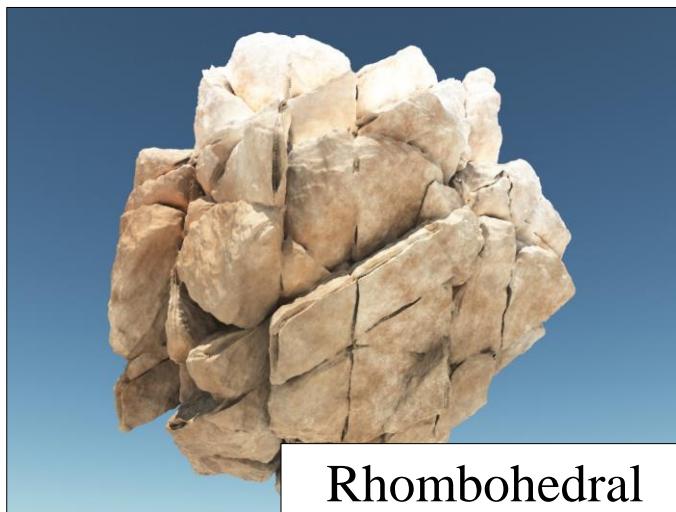
Polyhedral



Tabular



Equidimensional



Rhombohedral

Reliefs de falaise : amplification

