Simulations par méthode Lattice Boltzmann de l'équation de Barré de Saint-Venant pour écoulement environnemental de grande échelle

Nicolas Maquignon

CEREMA - REM - Compiègne

02/06/2021

Plan de présentation

Présentation - Cursus

10/2011 - 08/2015 : Thèse Université du Littoral (Calais) ; modélisation lattice Boltzmann en vue d'une application à l'épandage accidentel de Gaz Naturel Liquéfié

12/2015 - 12/2016 : Postdoc Université Aix Marseille M2P2 ; modèle LBM avec thermique et humidité dans LaBS (ProLB), micro-météorologie

04/2017 - 03/2019 : Postdoc Institut de Mathématiques de Toulouse/ Impetus AFEA (start up) ; simulations Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) d'explosion en champs proche (mine enterrée)

03/2019 - 02/2020 : Prestataire AMANORA tech. pour ArcelorMittal Dunkerque ; modèles de recherche opérationnelle pour automatisation des ponts

Depuis 11/2020 : Ingénieur modélisation numérique d'inondations au Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA)

Introduction & Objectifs

- Projet de simulation d'inondations par la méthode LBM

- Tirer partie de la compatibilité de l'algorithme LBM pour des calculs GPU

- Simulation LBM pour eaux peu profondes (Barré de Saint-Venant)

- Etablir des cartes d'inondations suivant différents scénarios, prédictions rapides ou temps réel (à terme)

Equation de Barré de Saint-Venant et LBM (SRT)

Continuité et flux Shallow Water, LBM shallow water :

$$\partial_t(h) + \partial_{x_j}(hu_j) = 0$$

$$\partial_t(hu_i) + \partial_{x_j}(hu_i u_j) = -g\partial_{x_i}(\frac{h^2}{2})^* + \nu\partial^2_{x_j x_j}(hu_i) + F_i$$

$$\underbrace{f_\alpha(x + e_\alpha\delta t, t + \delta t) - f_\alpha(x, t)}_{advection} = \underbrace{\Omega_\alpha(f)_{coll}}_{collision} + \underbrace{\frac{e_{\alpha i} F_i \delta t}{N_\alpha e^2}}_{terme\ force}$$

Terme de forçage :

$$F_i = \underbrace{-gh\partial_{x_i} z_b}_{pression\ isostatique*} \underbrace{-\frac{\tau_{bi}}{\rho} + \frac{\tau_{wi}}{\rho}}_{cisaillement} + \underbrace{f_c hu_i}_{Coriolis}$$

$$\tau_{bi} = \underbrace{\rho C_b u_i \sqrt{u_i u_j}}_{bed\ friction}$$

$$\tau_{wi} = \underbrace{\rho C_w u_{wi} \sqrt{u_{wi} u_{wj}}}_{wind\ resistance}$$

Collision SRT et moments :

$$\Omega_\alpha(f)_{coll} = -(f_\alpha - f_\alpha^{eq})/\tau \qquad \tau = .5 + \frac{3.\nu}{c^2\delta t}$$

$$\sum f_\alpha = h$$
$$\sum f_\alpha e_{\alpha i} = hu_i$$
$$\sum f_\alpha e_{\alpha i} e_{\alpha j} = \frac{gh^2}{2}\delta_{ij} + hu_i u_j$$

Distribution d'équilibre et dév. Chapman-Enskog :

$$f_0^{eq} = h - \frac{5gh^2}{6e^2} - \frac{2h}{3e^2} u_i u_j \delta_{ij}$$

$$f_\alpha^{eq} = \omega_\alpha(\frac{gh^2}{6e^2} + \frac{h}{3e^2} e_{\alpha i} u_i + \frac{h}{2e^4} e_{\alpha i} e_{\alpha j} u_i u_j \ldots$$
$$\ldots - \frac{h}{6e^2} u_i u_j \delta_{ij})$$

$$f = f^{(0)} + \epsilon f^{(1)} + \epsilon^2 f^{(2)} \ ; \ \partial = \epsilon\partial^{(1)} + \epsilon^2\partial^{(2)}$$

Modèles à temps de relaxation multiples avec terme source pluie et limite wet/dry

Lattice Boltzmann + source pluie :

$$\underbrace{f_\alpha(x + e_\alpha \delta t, t + \delta t) - f_\alpha(x, t)}_{advection} = \underbrace{\Omega_\alpha(f)_{coll}}_{collision} + \underbrace{\frac{e_{\alpha i} F_i \delta t}{N_\alpha e^2}}_{terme\ force}$$

Collision MRT(s), pourquoi ?

SRT instable, modes non hydrodynamiques, mauvaise invariance Galiléenne
En pratique instable en cas de discontinuité (i.e.barrage)

Source Pluie :

$$\Omega_0(f)_{coll} + = \underbrace{R \times dt}_{vitesse\ precipitation} \quad \text{i.e. } R \approx 10^{-5} m.s^{-1} \text{ (forte pluie)}$$

MRT Standard :

Matrices distribution vers moments standards et collision :

$$\Omega(f)_{coll} = -\mathcal{M}^{-1} \mathcal{S} \mathcal{M}(f - f^{eq}) \ ; \ \mathcal{M} = \left[e^a_{\alpha_i} e^b_{\alpha_j} \right]$$

$$\mathcal{S} = \begin{bmatrix} s_0 & & \\ & \ddots & \\ & & s_8 \end{bmatrix} \rightarrow \text{Q paramètres de relaxation}$$

$\rightarrow$ Manque d'invariance Galiléenne (comme SRT)

$\rightarrow$ Moments statistiquement inter-dépendants, hyperviscosité

MRT - Cascade (CA) et Cumulants (CU) :

$\mathcal{L} = \left[(e_{\alpha_i} - u_i)^a (e_{\alpha_j} - u_j)^b \right] \rightarrow$ Base MRT-CA

$\Omega(f)_{coll} = -\mathcal{L}^{-1} \mathcal{S} \mathcal{L}(f - f^{eq}) \rightarrow$ Collision MRT-CA

$C_{ab} = \sum_\alpha f_\alpha (e_{\alpha_i} - u_i)^a (e_{\alpha_j} - u_j)^b$: Moments centrés

$a + b <= 3 \quad C_{ab} = K_{ab}$, K_{ab} = cumulants (MRT-CU)

$K_{22} = C_{22} - (C_{20} C_{02} + 2C_{11}^2)/h$

Limiteurs (wet/dry) :

Limiteur en h :

Si $(h < h_{limit}) \rightarrow (h = h_{limit})$ & $(u = 0)$

Limiteur en Fr :

Si $(Fr > Fr_{limit}) \rightarrow (u = \frac{Fr_{lim}}{Fr} u)$

$h_{lim} = 10^{-4}$, ou $h_{lim} = 10^{-7}$ (pluie)

Notre approche stable et simplifiée

Modèle Stable et Simplifié (S&S)

- Modèle basé sur des étapes de prédiction-correction (fractional step)
- Déjà utilisée pour des cas gazeux, absence de modèle shallow water de ce type
- Réduction de besoin en mémoire jusqu'à -70 %
- Implémentation simplifiée des conditions limites

Prédicteur :

$$h^* = \sum_\alpha f_{sw}^{eq,\alpha}(\mathrm{r} - \mathrm{e}_\alpha \delta t, t - \delta t)$$

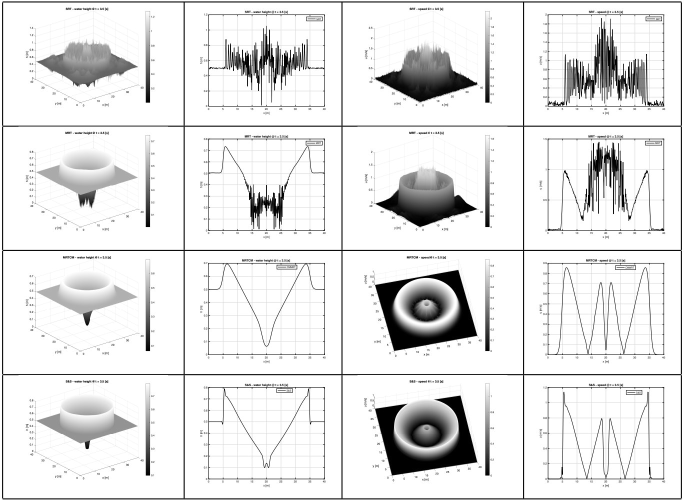
$$h^* \mathrm{u}^* = \sum_\alpha f_{sw}^{eq,\alpha}(\mathrm{r} - \mathrm{e}_\alpha \delta t, t - \delta t)\mathrm{e}_\alpha$$

Correcteur :

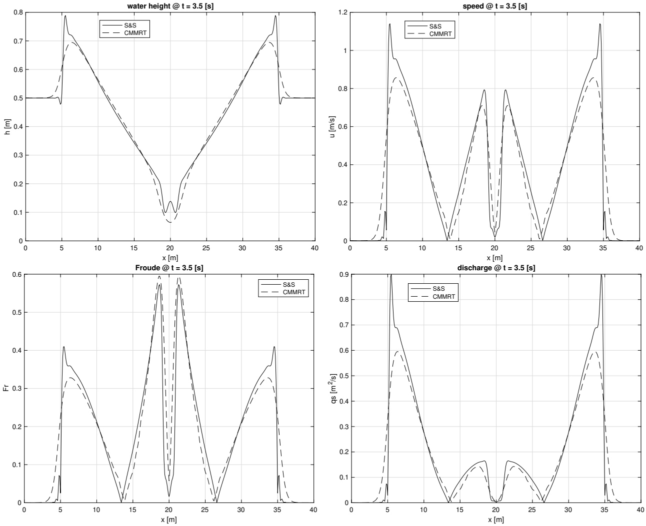
$$h = h^*$$

$$hu = h^* u^* + (\tau - 1) \sum_\alpha e_\alpha f_{sw}^{eq,\alpha}(r + e_\alpha \delta_t, t) - (\tau - 1)h(r, t - \delta_t)u(r, t - \delta_t) + F\delta_t$$

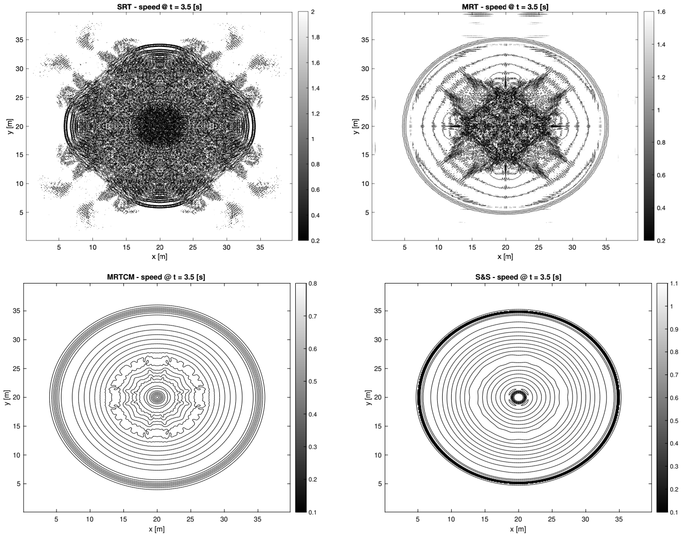
Cas test rupture de barrage circulaire



Cas test rupture de barrage circulaire



Cas test rupture de barrage circulaire



Cas Malpasset Mono GPU

MNT et hauteur d'eau à t=3000 s (S&S)

Domaine

- N=X*Y = 3000*5000 cellules
- Méthode A-B pattern (2 DFs)
- $(\underbrace{1}_{Macro} + \underbrace{2 * 9}_{2\ DFs})$*sizeof(float)*N = 1.14 GO
- Zone de 15.[km]*25.[km]

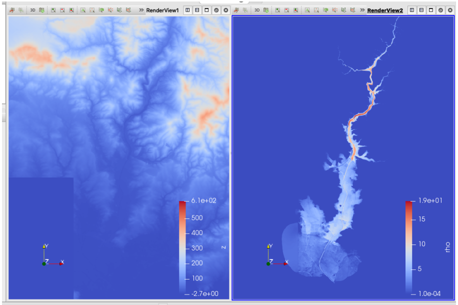
dx = 5.[m]

dt = .0416[s]

h_{max} =55.[m]

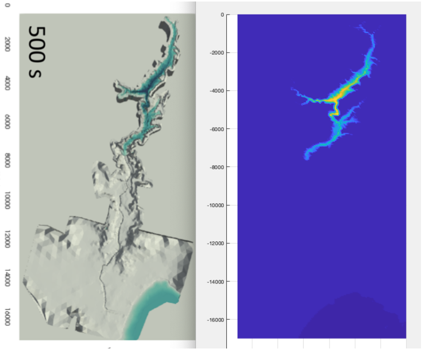
u0 = 0. [m/s]

$\nu = 10^{-3} m^2/s$

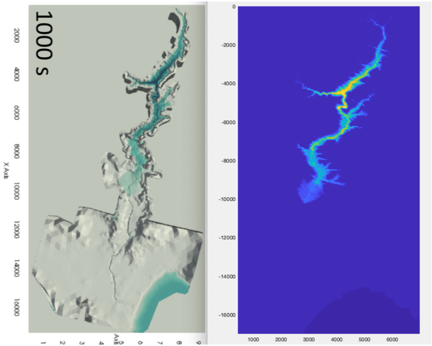


Cas Malpasset Mono GPU (hauteur d’eau)

- Comp. [1] (gche) simu CA h (dte) - 500 [s]

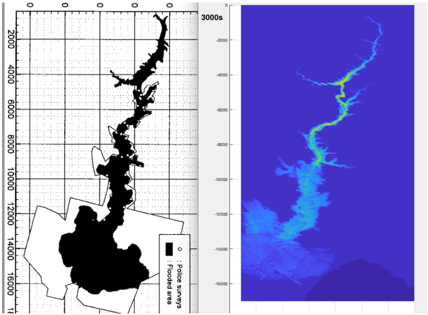


- Comparaison [1] simu CA h - 1000 [s]

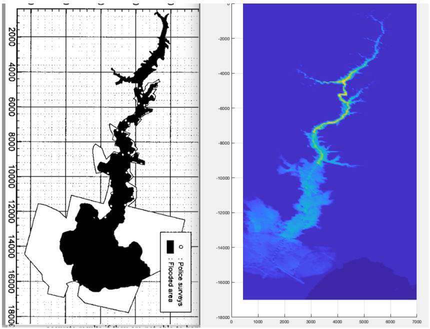


Cas Malpasset Mono GPU

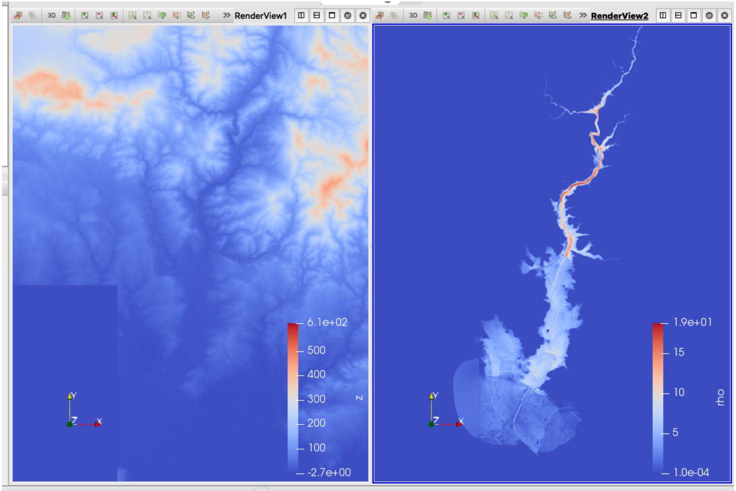
- Comparaison [2] simu CA (h) - 3000 [s]



- Comparaison [2] simu CU (h)- 3000 [s]

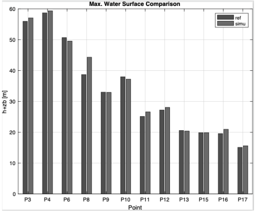


Malpasset avec modèle simplifié

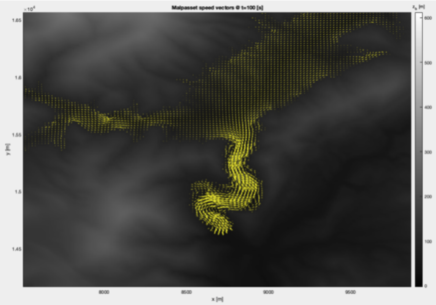


Wet/dry boundary - validation quantitative

- Cas test obstacle triangulaire ref [1]
- Données hygro. Malpasset - h maxima ref [2]



Erreur moyenne entre 3% et 4%



Bibliographie

(1) *LB SWE for large scale hydraulic analysis - Sara Venturi - 2018*

(2) *FVM for 2-Dimensional SW Flows on Unstructured Grids - Tae Hoon Yoon, F.ASCE, and Seok-Koo Kang*

(3) *LBM for rain-induced overland flow - Ding, Liu, Peng, Xing 2018*

(4) *Z.Chen, C.Shu, and D.Tan. High-order simplified thermal lattice Boltzmann method for incompressible thermal flows. International Journal of Heat and Mass Transfer, 127 :1–16, 2018.*

(5) *Kevin R. Tubbs and Frank T.-C. Tsai. GPU accelerated lattice Boltzmann model for shallow water flow and mass transport. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 86(3) :316–334, 2011.*

(6) *Alessandro De Rosis. A central moments-based lattice Boltzmann scheme for shallow water equations. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,319 :379–392,2017.*

(7) *Sara Venturi, Silvia Di Francesco, Martin Geier, and Piergiorgio Manciola. A new collision operator for lattice Boltzmann shallow water model : a convergence and stability study. Advances in Water Resources,135 :103474,2020.*

(8) *Peter Bailey, Joe Myre, Stuart Walsh, David Lilja, and Martin Saar. Accelerating lattice boltzmann fluid flow simulations using graphics processors. Proceedings of the International Conference on Parallel Processing, pages 550–557, 09 2009.*

(9) *J.G. Zhou. A lattice Boltzmann model for the shallow water equations. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 191(32) :3527–3539, 2002.*

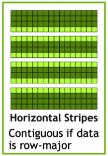
(10) *MULTI GPU PROGRAMMING MODELS Jiri Kraus, Senior Devtech Compute, GTC March 2019*

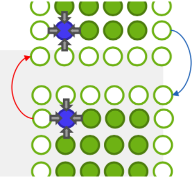
(11) *Scalable Cluster Computing with NVIDIA GPUs Axel Koehler – NVIDIA - 2012*

2 GPUs

Motivation

- Taille de domaine pouvant rapidement s'accroître (Nive...)
- Besoin de diminuer t_{simu}/t_{phys}
- Mettre en oeuvre les mécanismes de transferts GPU-GPU





		Network nodes	
		Single	Multiple
Single process	Single-threaded		N/A
	Multi-threaded		N/A
Multiple processes			

GPUs can communicate via P2P or via host memory

GPUs communicate via host-side message passing

Algorithme

- 1 Thread CPU - 1 Stream GPU
- Copies mémoire synchrones
- Lancement kernels asynchrones
- GPU 0 et GPU 1 s'exécutent simultanément
- Transferts GPU P2P car 1 seul noeud [10] [11]

Malpasset	1 GPU [MLUPS]	2 GPUS [MLUPS]	T. simu 1 GPU [min]	T. simu 2 GPUs. [min] (Projection)
GTX 1080 Ti	233	466	64	32
RTX 3090	355	710	42	21

Cas Nive

Domaine

- X*Y = 7582*8860 cellules
- Mémoire 10.27 GO (double précision)
- Zone de 38.[km]*44.[km]
- Test sur zone de 10.[km]*10.[km]

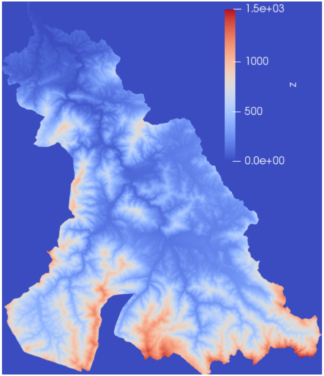
dx = 5.[m]

dt = .0416[s]

h0 = 10^{-7}[m]

u0 = 0. [m/s]

R = 10^{-5} [m/s] (36 mm/h)



Performances

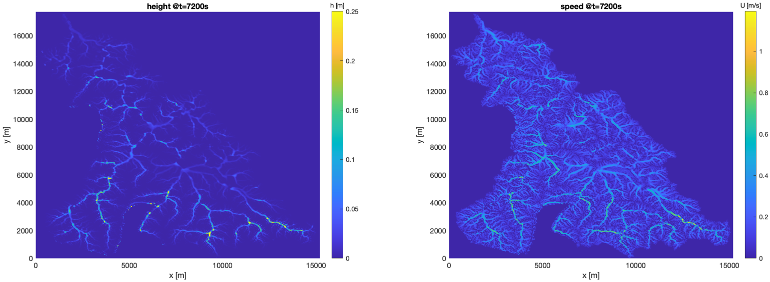
- 2*RTX 3090 : 700 MLUPS / 10492 cores
- 1.[s] phys. $\longrightarrow$ 2.3[s] simu
- 3 jours phys. $\longrightarrow$ 7 jours de simu ...

Performances Mono GPU

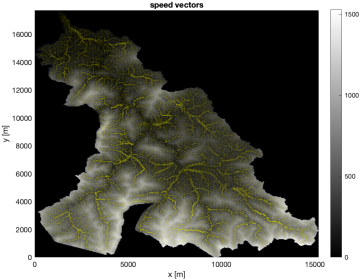
	K20C	RTX 3090	P100	V100
MLUPS	161	236	559	1030
tsimu / tphys	8,36	5,7	2,4	1,3
Worst Salinas	237	No data	No data	2898
Best Salinas	784	No data	No data	5842
Worst/Actual	1,47			2,81
Best/Actual	4,87			5,67

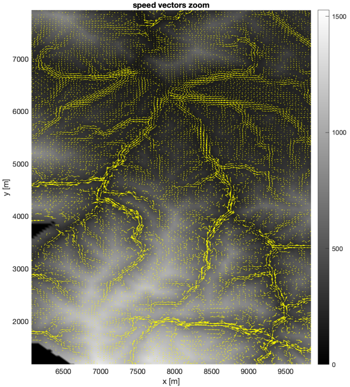
Ref Salinas : https://doi.org/10.1016/j.cpc.2019.107009

Cas Nive test pluie



Cas Nive test pluie





Conclusion & travaux futurs

- Problème de conservation de masse cas Nive
- Performances RTX 3090 beaucoup trop basses
- Conditions limites ouvertes
- MNT hydrologiquement cohérent