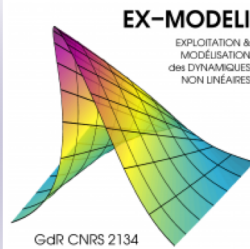


(1) **LaMCoS**
Laboratoire de Mécanique
des Contacts et des Structures
UMR 5259

(2)  **MICHELIN**

David Dureisseix et al

13/06/2024



Jusqu'où pousser la non-régularité en dynamique transitoire explicite ?

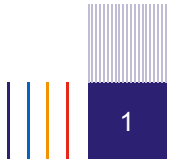
David Dureisseix⁽¹⁾, Paul Larousse^(1,2),
Anthony Gravouil⁽¹⁾, Jean Di Stasio⁽²⁾



INSA INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
LYON



**INSTITUT
CARNOT**
Ingénierie@Lyon





Le cadre plus large

Dans le cadre de l'utilisation de la dynamique explicite pour les problèmes d'impacts – Collaboration LaMCoS / Michelin (thèses CIFRE)

Dynamique explicite matrix-free : on ne veut pas pénaliser les conditions non-régulières (réduction du pas de temps critique, paramètre numérique)

- Utilisation d'un schéma symplectique de type différence centrée [1]
- Formalisme non-régulier à la J. J. Moreau [2]

=> schéma CD-Lagrange [3]

[1] Hairer et al, Geometric numerical integration illustrated by the Störmer–Verlet method, Acta Num. 2003

[2] Moreau, Liaisons unilatérales sans frottement et chocs inélastiques. CRAS 296, 1983

[3] Fekak et al, A new heterogeneous asynchronous explicit–implicit time integrator for nonsmooth dynamics, Comput. Mech. 60. 2017



Le cadre plus large

Dans le cadre de l'utilisation de la dynamique explicite pour les problèmes d'impacts – Collaboration LaMCoS / Michelin (thèses CIFRE)

Dynamique explicite matrix-free : on ne veut pas pénaliser les conditions non-régulières (réduction du pas de temps critique, paramètre numérique)

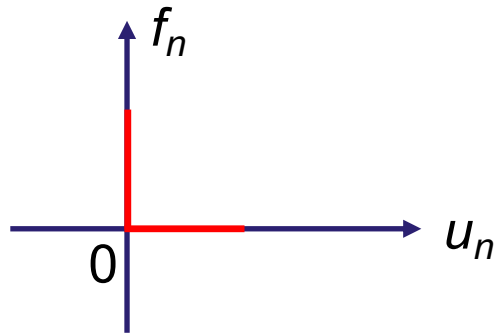
- Utilisation d'un schéma symplectique de type différence centrée
- Formalisme non-régulier à la J. J. Moreau

=> schéma CD-Lagrange

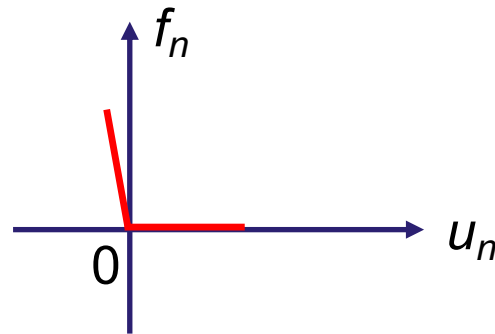
Ici : on veut tester et pousser la non-régularité du comportement d'une interface au plus loin

Comportement du contact / impact

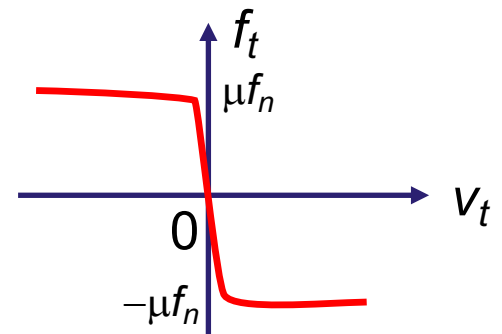
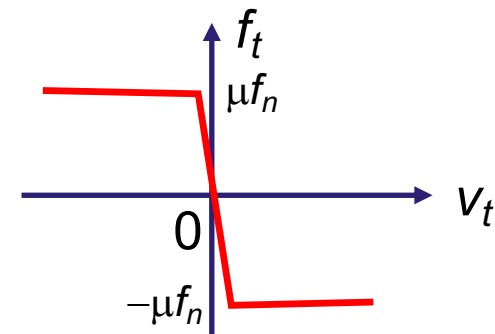
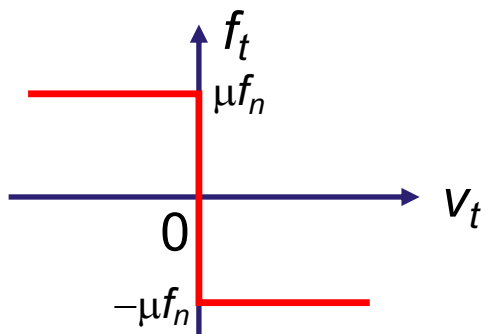
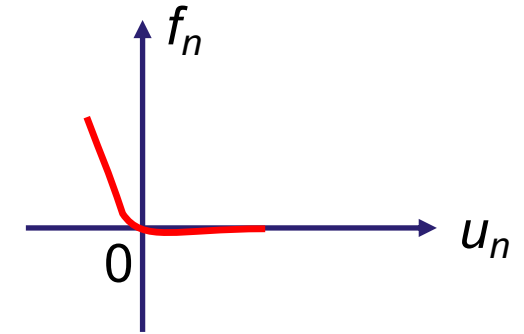
Contact parfait



Pénalisé

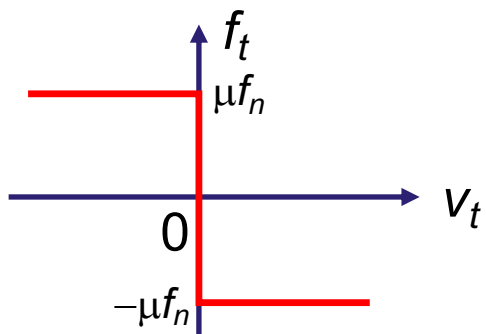
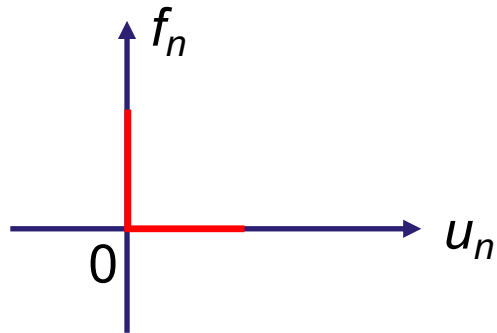


+ Régularisé



Comportement du contact / impact

Contact parfait



Le schéma explicite CD-Lagrange

- Une version de la différence centrée dans le cas régulier :

$$U_{n+1} = U_n + hV_{n+1/2} \quad \text{calcul explicite de la configuration à } t_{n+1}$$

$$M(V_{n+3/2} - V_{n+1/2}) + hKU_{n+1} = hf_{\text{ext},n+1}$$

$$\text{d'où } V_{n+3/2} = V_{n+1/2} + M^{-1}(hf_{\text{ext},n+1} - hKU_{n+1}) \triangleq V_{\text{free}}$$

V : vitesse, U : déplacement, h : pas de temps (supposé constant ici)

Le schéma explicite CD-Lagrange

- Une version de la différence centrée dans le cas régulier :

$$M(V_{n+3/2} - V_{n+1/2}) + hKU_{n+1} = hf_{\text{ext},n+1}$$

- Dans le cas non-régulier, avec la formulation vitesse-impulsion de J. J. Moreau :

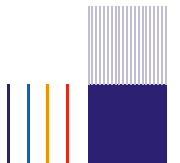
$$M(V_{n+3/2} - V_{n+1/2}) + hKU_{n+1} = hf_{\text{ext},n+1} + L^T r_{n+3/2}$$

$$\text{d'où } V_{n+3/2} = V_{\text{free}} + M^{-1}L^T r_{n+3/2}$$

$$\text{d'où le LCP local } v_{n+3/2} \triangleq LV_{n+3/2} = v_{\text{free}} + H r_{n+3/2}$$

$$\text{et le comportement } \mathcal{R}(v_{n+3/2}, r_{n+3/2}) = 0$$

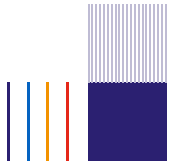
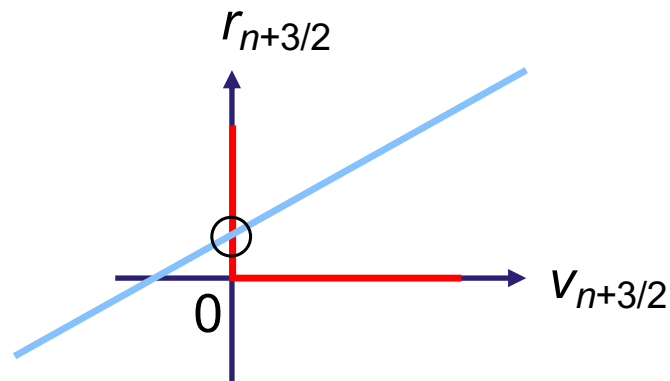
$$\text{où } H = LM^{-1}L^T \text{ est diagonal}$$



Le schéma explicite CD-Lagrange

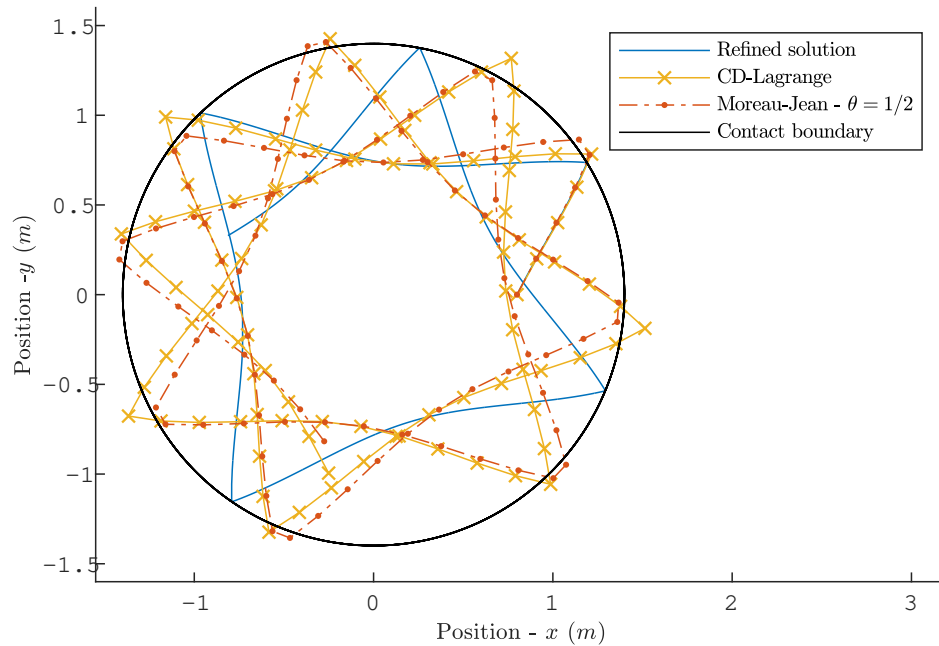
- Avec H diagonal (LCP local) $v_{n+3/2} = v_{\text{free}} + H r_{n+3/2}$
 $\mathcal{R}(v_{n+3/2}, r_{n+3/2}) = 0$

La résolution ressemble à :

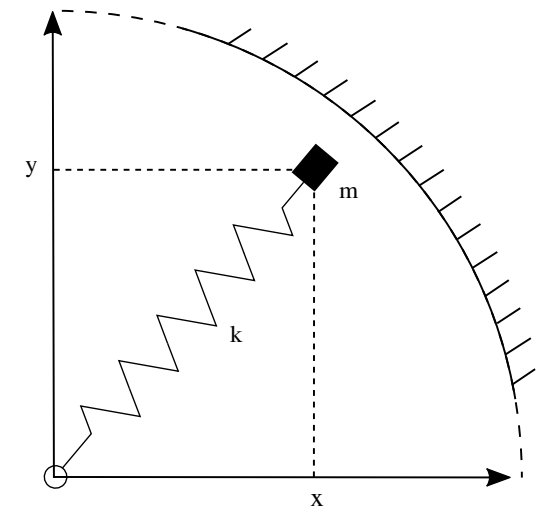


Le schéma explicite CD-Lagrange

- Symplectique
- Exemple de benchmark : ressort tournant à 2 ddl



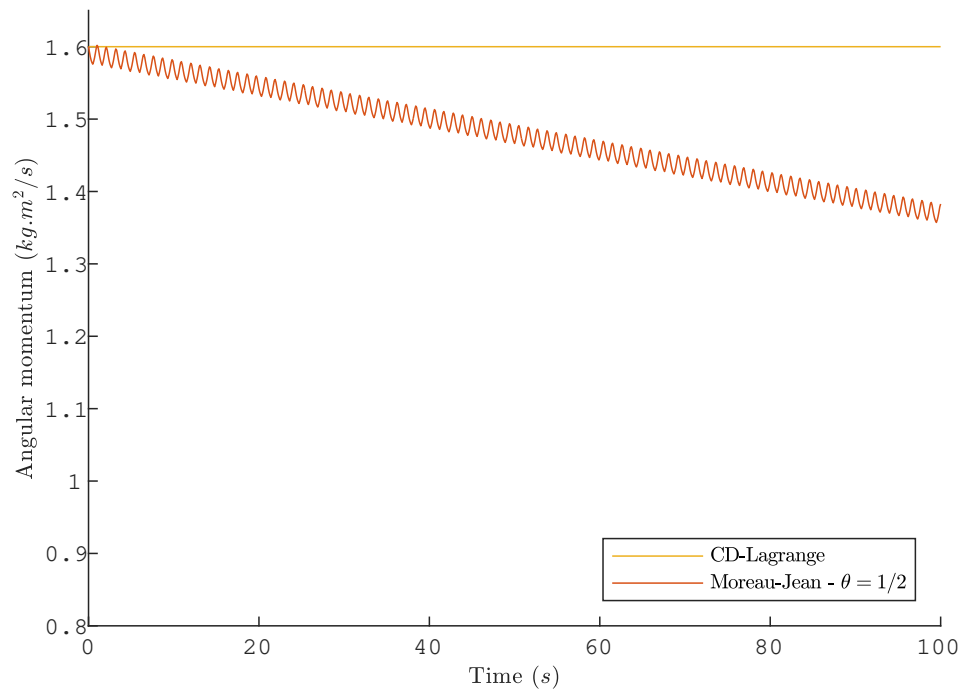
(contact parfait sans frottement)



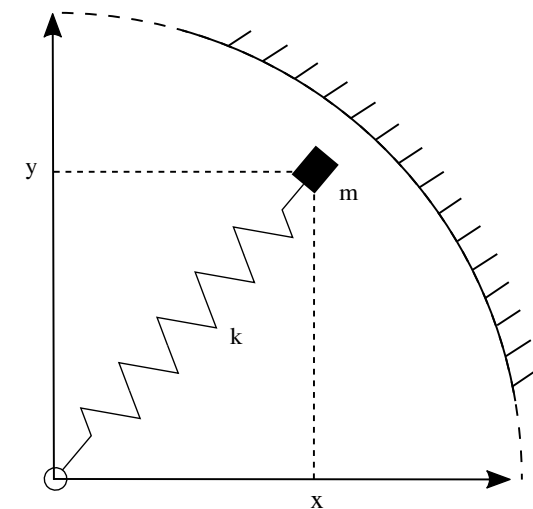
Di Stasio et al, Benchmark cases for robust explicit time integrators in non-smooth transient dynamics, *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*, 2019

Le schéma explicite CD-Lagrange

- Symplectique
- Exemple de benchmark : ressort tournant à 2 ddl



(contact parfait sans frottement)



Une publication académique

- Un article a été soumis et accepté pour publication dans la revue (diamond open access) JTCAM : une « épi-revue »

An explicit dynamics framework suited to highly non-smooth interface behaviors

 David DUREISSEIX¹,  Paul LAROUSSE^{1,2},  Anthony GRAVOUIL¹, and  Jean DI STASIO²

¹ INSA Lyon, CNRS, LaMCoS, UMR5259, F-69621 Villeurbanne, France

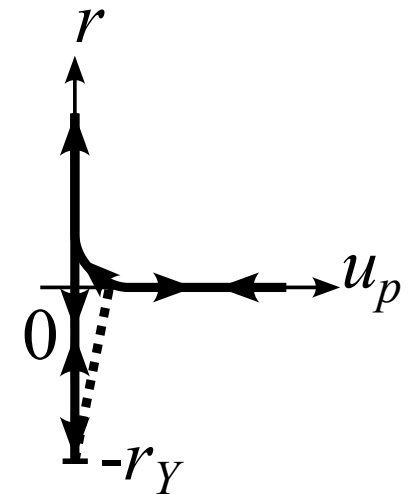
² Centre de technologie de Ladoux, Manufacture française de pneumatiques Michelin, F-63000 Clermont-Ferrand, France

<https://hal.science/hal-04146784>

Cas test 0D numéro 2

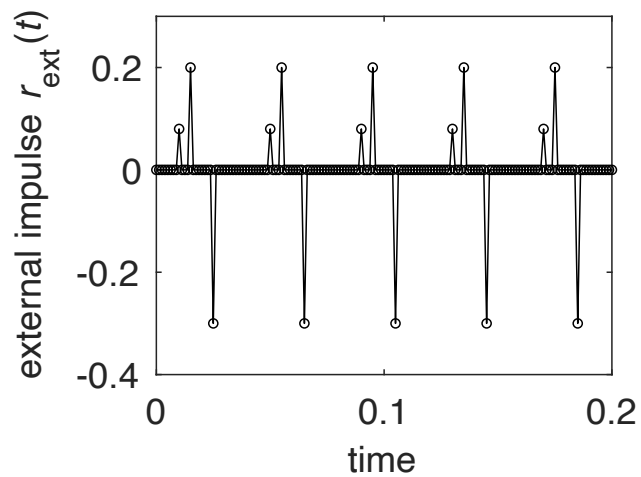
- Le Post-it® non-régulier :
 - interface rigide
 - parfaitement fragile
 - avec adhésion cicatrisante

test	1	2	3	3D
efficiency decrease n_b	∞	10	∞	∞
adhesion limit $R_{Y\max}$	∞	∞	∞	10^{-4}
delay effect τ_Y	0	0	0.08	0.2
normal to tangent influence λ	-	-	-	0.8
friction coefficient μ	-	-	-	0.1

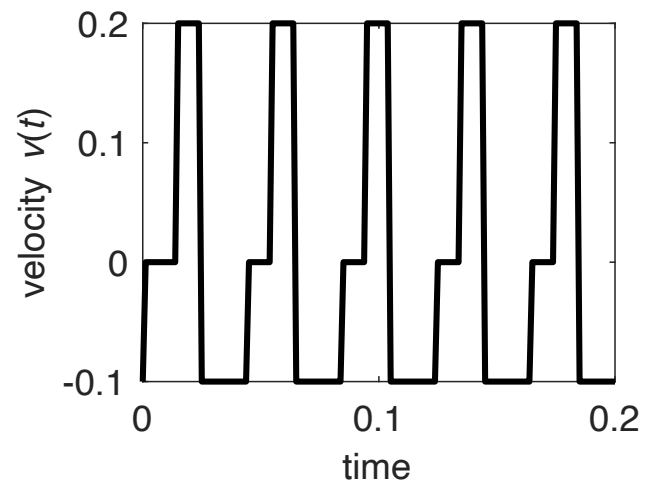


Cas test 0D numéro 2

- Le Post-it[®] non-régulier



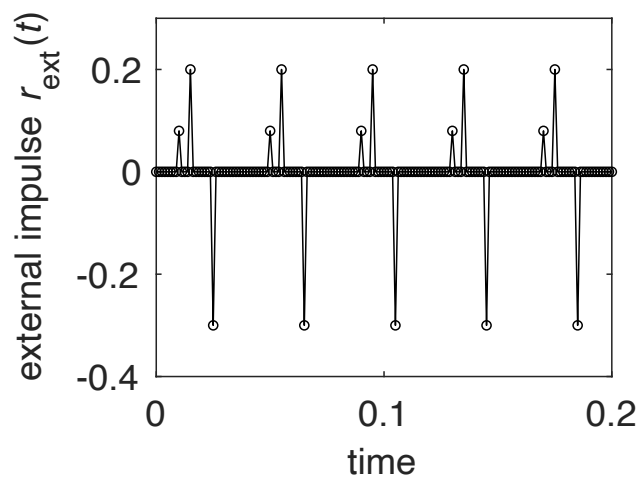
(une sollicitation avec des chocs)



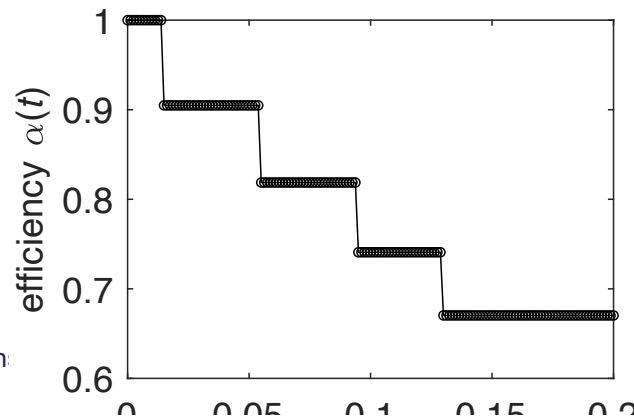
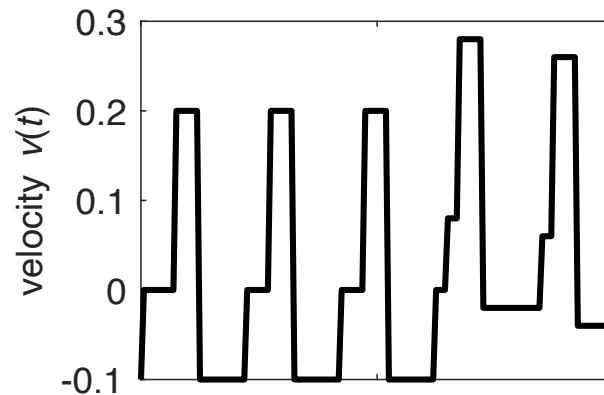
test	1
efficiency decrease n_b	∞
adhesion limit $R_{Y_{max}}$	∞
delay effect τ_γ	0
normal to tangent influence λ	-
friction coefficient μ	-

Cas test 0D numéro 2

- Le Post-it[®] non-régulier
- Décroissance de l'efficacité de réadhésion



(une sollicitation avec des chocs)



test	1	2
efficiency decrease n_b	∞	10
adhesion limit $R_{Y_{\text{max}}}$	∞	∞
delay effect τ_γ	0	0
normal to tangent influence λ	-	-
friction coefficient μ	-	-

Cas test 0D numéro 3

- Le Post-it[®] non-régulier
- Nécessité d'un effet non-local en temps (mémoire)

Quel critère de rupture ? En impulsion ($r > r_Y$) ou en effort ($f > f_Y$) ?

Si sollicitation régulière en effort, $r = hf \rightarrow 0$ quand $h \rightarrow 0$ donc il faut $f > f_Y$

Si sollicitation par un choc/impulsion, $f = r/h \rightarrow \infty$ quand $h \rightarrow 0$ donc il faut $r > r_Y$

Cas test 0D numéro 3

- Le Post-it[®] non-régulier
- Nécessité d'un effet non-local en temps (mémoire)

Quel critère de rupture ? En impulsion ($r > r_Y$) ou en effort ($f > f_Y$) ?

Si sollicitation régulière en effort, $r = hf \rightarrow 0$ quand $h \rightarrow 0$ donc il faut $f > f_Y$

Si sollicitation par un choc/impulsion, $f = r/h \rightarrow \infty$ quand $h \rightarrow 0$ donc il faut $r > r_Y$

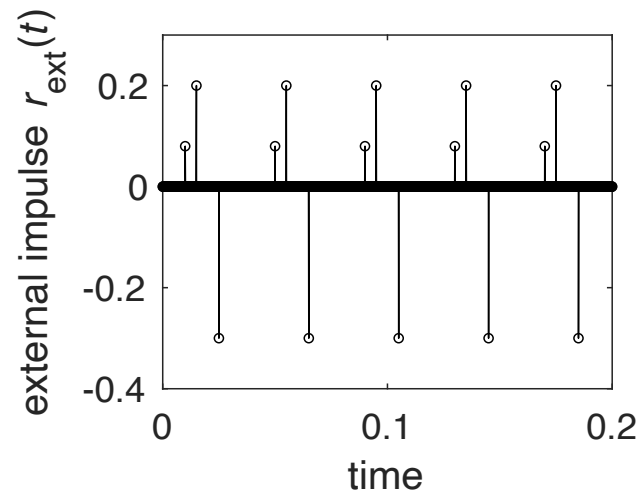
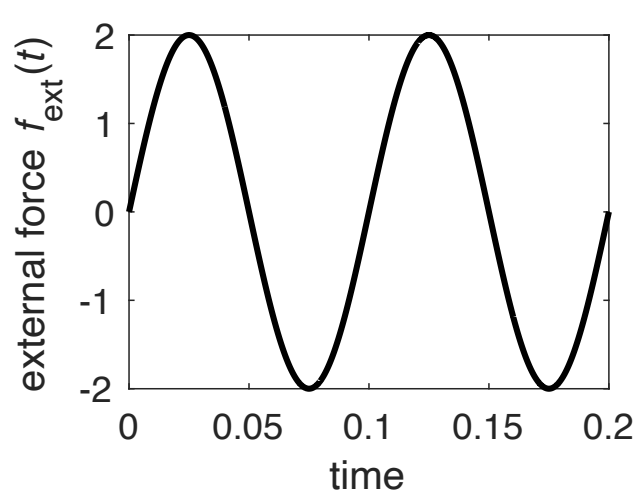
D'où un critère du type $R > R_Y$ avec

$$R = \int_{t-\tau_Y}^t f dt = \sum_{i, t_i \in [t-\tau_Y, t]} r_i$$

N.B. Ceci n'est pas un effet retard

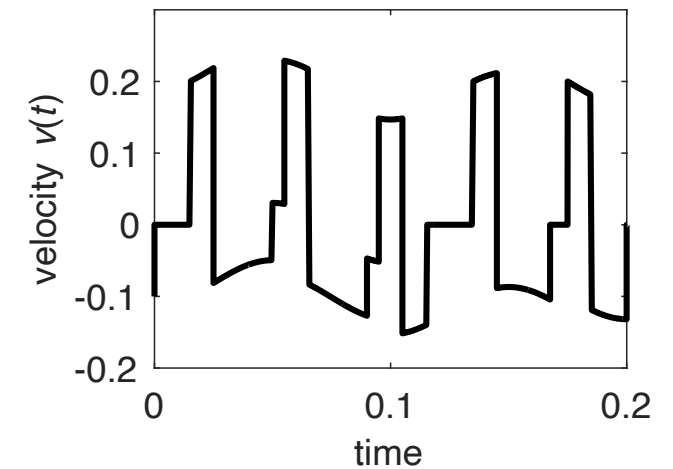
Cas test 0D numéro 3

- Le Post-it[®] non-régulier
- Nécessité d'un effet non-local en temps (mémoire)



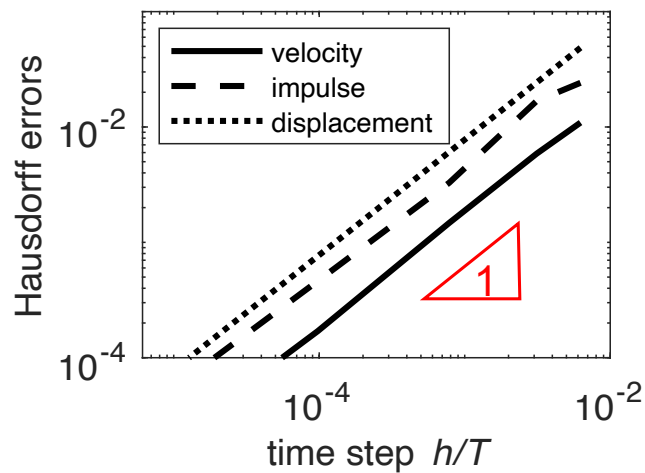
(une double sollicitation : à la fois en force régulière et avec des chocs)

test	1	2	3
efficiency decrease n_b	∞	10	∞
adhesion limit $R_{Y_{\text{max}}}$	∞	∞	∞
delay effect τ_Y	0	0	0.08
normal to tangent influence λ	-	-	-
friction coefficient μ	-	-	-



Cas test 0D numéro 3 – convergence espace-temps

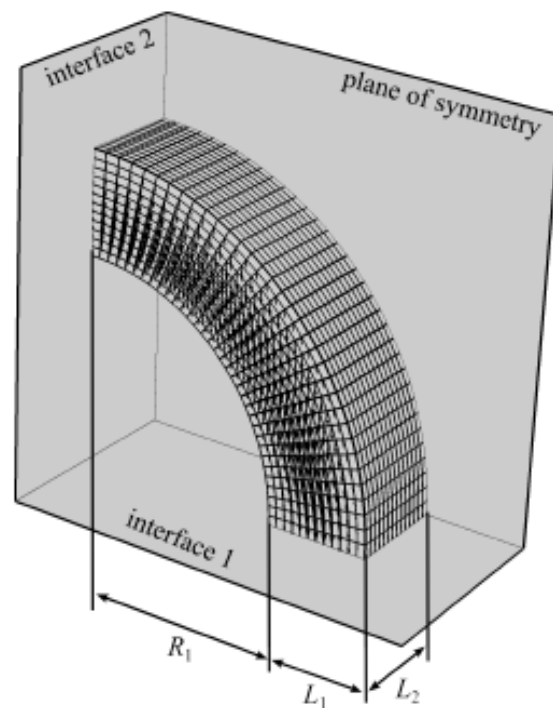
- Le Post-it[®] non-régulier
- Nécessité d'un effet non-local en temps (mémoire)



test	1	2	3
efficiency decrease n_b	∞	10	∞
adhesion limit $R_{Y_{max}}$	∞	∞	∞
delay effect τ_γ	0	0	0.08
normal to tangent influence λ	-	-	-
friction coefficient μ	-	-	-

Cas test 3D

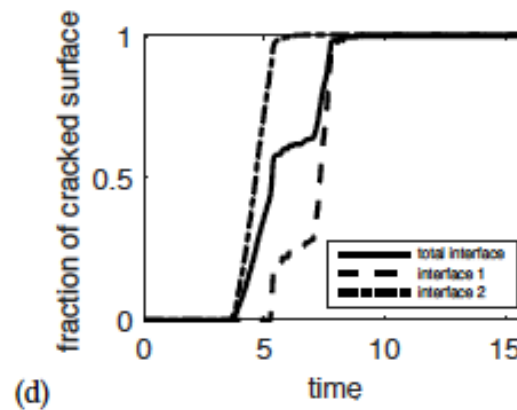
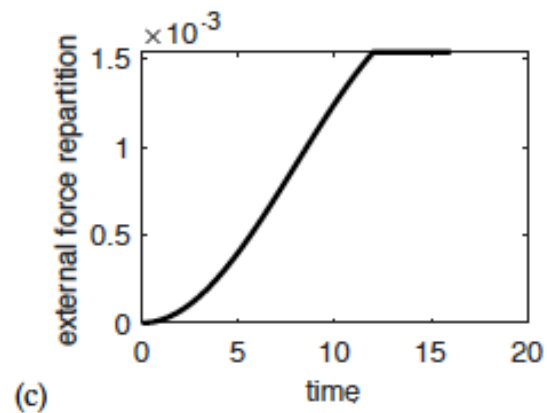
- Le Post-it[®] non-régulier
- Nécessité d'un effet non-local en temps (mémoire)
- Couplage avec le frottement tangentiel



test	1	2	3	3D
efficiency decrease n_b	∞	10	∞	∞
adhesion limit $R_{Y_{\max}}$	∞	∞	∞	10^{-4}
delay effect τ_γ	0	0	0.08	0.2
normal to tangent influence λ	-	-	-	0.8
friction coefficient μ	-	-	-	0.1

Cas test 3D

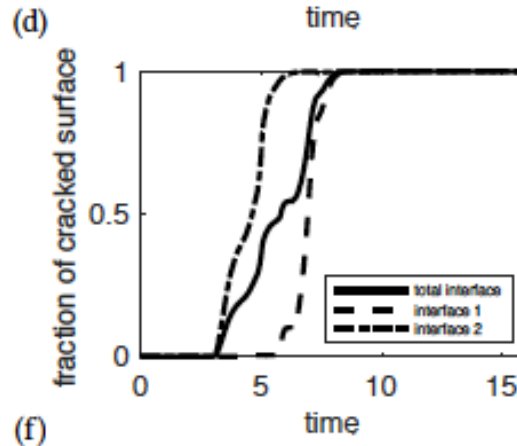
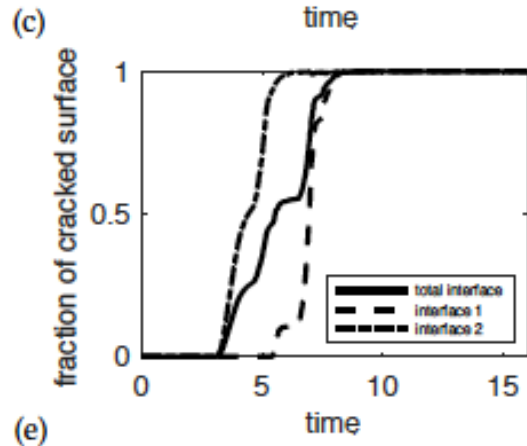
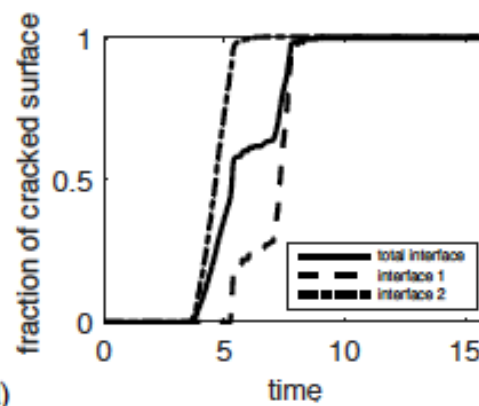
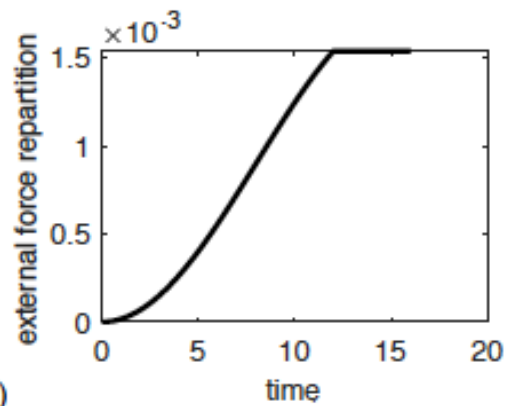
- Le Post-it[®] non-régulier
- Nécessité d'un effet non-local en temps (mémoire)
- Couplage avec le frottement tangentiel



test	1	2	3	3D
efficiency decrease n_b	∞	10	∞	∞
adhesion limit $R_{Y_{max}}$	∞	∞	∞	10^{-4}
delay effect τ_γ	0	0	0.08	0.2
normal to tangent influence λ	-	-	-	0.8
friction coefficient μ	-	-	-	0.1

Cas test 3D – convergence espace-temps

- Le Post-it[®] non-régulier
- Nécessité d'un effet non-local en temps (mémoire)



test	1	2	3	3D
efficiency decrease n_b	∞	10	∞	∞
adhesion limit $R_{Y_{max}}$	∞	∞	∞	10^{-4}
delay effect τ_Y	0	0	0.08	0.2
normal to tangent influence λ	-	-	-	0.8
friction coefficient μ	-	-	-	0.1



Conclusion

- Faisabilité et robustesse : implémentation dans une même trame de code explicite matrix-free
- Traitement de différentes sortes de non-régularités : non-intrusif car traitement localisé dans le code
- Modèles de comportement ~~non-locaux en espace~~ non-locaux en temps (ex. endommagement retardé...)

Traitement efficace dans le cas de contact non-conforme (conditions non locales) ?
Cas de l'incompressibilité ?

...