

LES APPORTS DE L'HYDRAULIQUE 3D DANS L'ÉVALUATION DES POTENTIELS DE DANGER

THE CONTRIBUTION OF 3D HYDRAULICS TO THE ASSESSMENT OF HAZARD POTENTIAL

Gwenaël CHEVALLET, Eric VUILLERMET

BRL Ingénierie, 1105, av Pierre Mendès France - BP 94001 30 001 NIMES Cedex 5 - FRANCE

gwenael.chevallet@brl.fr ; eric.vuillermet@brl.fr

MOTS CLEFS

Hydraulique, 3D-CFD, Flow3D, évaluation des potentiels de danger

KEY WORDS

Hydraulics, 3D-CFD, Flow3D, assessment of hazard potentials

RÉSUMÉ

1. Contexte : Dans le cadre des études de dangers, nous sommes amenés à devoir évaluer les potentiels de dangers liés à certains aléas tel que des chutes de blocs ou des avalanches dans la retenue (aléas initiateurs d'une vague solitaire) ou liés à un déferlement de vagues établies sous un régime de vent sur un parement. Si les premières évaluations peuvent s'appuyer sur des approches empiriques, la détermination des volumes de paquets d'eau franchissant le barrage ou le seuil de son évacuateur peut nécessiter des simulations numériques afin d'intégrer la morphologie de la retenue, ou de prendre en compte un parement mixte enrochement – surface lisse. L'hydraulique 3D, et plus spécifiquement la 3D-CFD, a fait irruption dans l'ingénierie des digues et des barrages, il y a près de 20 ans. Utilisée dans un premier temps uniquement pour les projets de grande ampleur ou particulièrement complexes, elle est aujourd'hui exploitée pour des sujets divers et variés, parfois très tôt dans la conception ou le diagnostic des ouvrages. Elle est devenue un complément indispensable aux modèles physiques réduits. Elle a utilement été employée par BRLi pour répondre aux questions soulevées par ces potentiels de danger. **2. Etude de cas : Franchissement de vagues solitaires au droit d'un seuil d'évacuateur.** Il sera abordé la simulation, pour une chute de blocs ou pour une avalanche, de la propagation d'une vague solitaire sur une retenue, permettant d'en évaluer le volume de franchissement. Ces simulations intègrent notamment les problématiques de réflexion et de réfraction des ondes des vagues aujourd'hui impossibles à appréhender de manière empirique. **3. Etude de cas : Déferlement sur un parement mixte.** Il sera abordé la simulation du déferlement des vagues sur un parement mixte (rugueux et lisse), pour lequel aucune approche empirique n'existe, permettant d'en appréhender les volumes de franchissement. **4. Conclusion :** Ces approches permettent d'évaluer plus finement les hydrogrammes de franchissement qui couplés à la simulation de la propagation en aval de ce volume d'eau permettent d'en évaluer plus justement le niveau de gravité.

ABSTRACT

1. Context: In the context of hazard studies, we are called upon to assess the hazard potential associated with certain hazards, such as boulder falls or avalanches in the reservoir (solitary wave-initiating hazards), or with the breaking of wind-driven waves on a facing. While initial assessments can be based on empirical approaches, determining the volumes of water packets overtopping the dam or the spillway may require numerical simulations to incorporate the morphology of the impoundment, or to take into account a mixed riprap - smooth surface facing. 3D hydraulics, and more specifically 3D-CFD, burst onto the scene of dike and dam engineering nearly 20 years ago. Initially used only for large-scale or particularly complex projects, it is now used for a wide variety of subjects, sometimes very early on in the design or diagnosis of structures. It has become an indispensable complement to physical models. It has been used by BRLi to answer the questions raised by these hazard potentials. **2. Case study: Solitary wave overtopping at a spillway weir.** The simulation of the propagation of a solitary wave over a reservoir in the event of a boulder fall or avalanche will be discussed, in order to assess the volume of the wave overtopping the reservoir. In particular, these simulations take into account the problems of wave reflection and refraction, which are currently impossible to understand empirically. **3. Case study: Wave breaking on a mixed facing.** The simulation of wave breaking on a mixed facing (rough and smooth), for which no empirical approach exists, will be discussed. **4. Conclusion:** These approaches enable a more accurate assessment of overtopping hydrographs, which, coupled with the simulation of the downstream propagation of this volume of water, enable a more accurate assessment of the level of severity.

1. CONTEXTE

Dans le cadre des études de dangers, nous sommes amenés à devoir évaluer les potentiels de dangers liés à certains aléas tel que des chutes de blocs ou des avalanches dans la retenue (aléas initiateurs d'une vague solitaire) ou liés à un déferlement de vagues établies sous un régime de vent sur un parement. Si les premières évaluations peuvent s'appuyer sur des approches empiriques, la détermination des volumes de paquets d'eau franchissant le barrage ou le seuil de son évacuateur peut nécessiter des simulations numériques afin d'intégrer la morphologie de la retenue, ou de prendre en compte un parement mixte enrochement – surface lisse. L'hydraulique 3D, et plus spécifiquement la 3D-CFD, a fait irruption dans l'ingénierie des digues et des barrages, il y a près de 20 ans. Utilisée dans un premier temps uniquement pour les projets de grande ampleur ou particulièrement complexes, elle est aujourd'hui exploitée pour des sujets divers et variés, parfois très tôt dans la conception ou le diagnostic des ouvrages. Elle est devenue un complément indispensable aux modèles physiques réduits. Elle a utilement été employée par BRLi pour répondre aux questions soulevées par ces potentiels de danger. Le logiciel employé dans ces exemples est le logiciel Flow3D développé par Flow Science.

2. ETUDE DE CAS : FRANCHISSEMENT DE VAGUES SOLITAIRES AU DROIT D'UN SEUIL D'EVACUATEUR

2.1. Problématique

Le barrage de Pont Baldy (classe A) est un barrage de type voûte épaisse en béton (hauteur de 54 m au-dessus du terrain naturel) qui s'appuie en rive droite sur un évacuateur de crue à seuil libre (de profil Creager de 20 m de large). Sa construction date de 1964 et sa mise en eau de fin 1965 – début 1966. E.D.S.B. (Énergie Développement Services du Briançonnais) en est le concessionnaire et l'exploite pour la production d'hydroélectricité, à destination des villes de Briançon et Saint-Martin-de-Queyrières. Il permet de stocker près d'1 hm³.



Figure 1 : barrage de Pont-Baldy, vue d'ensemble

Des études préalables (réfs. [1] et [2]) ont défini le risque de chutes de blocs dans la retenue et permis de définir de manière détaillée les scénarios à étudier. Ces dernières ont notamment précisé les caractéristiques du volume des blocs, leurs hauteurs ou vitesses de chutes. Par ailleurs, des couloirs d'avalanche et les caractéristiques associées avaient également été définis. Toutefois, ni la définition des ondes incidentes ni leur propagation dans la retenue n'avaient fait l'objet d'une analyse

suffisamment poussée. C'est pourquoi E.D.S.B. a demandé à BRLi de modéliser grâce au logiciel Flow3D la propagation de ces ondes dans la retenue. Cette dernière a été réalisée (pour une cote de RN ou des PHE) :

- en injectant sur la retenue des blocs dotés des caractéristiques géométriques et de vitesses,
- en imposant comme conditions limites l'impulsion d'une avalanche dont les caractéristiques ont été préalablement appréciées à l'aide de formules empiriques.

2.2.Chute de blocs

Caractéristiques des chutes de blocs

Les caractéristiques des chutes de blocs étudiées sont précisées dans le tableau ci-dessous :

Scénario	Type de chute	Hauteur de chute (m)	Volume (m3)	Vitesse (m/s)	Commentaire
Masse A2-A3 1 seul site avec deux scénarios					
	Chute du bloc A3b	35	3		Un scénario type éboulement en masse de plusieurs centaines de m3 n'est pour le moment pas retenu dans ce secteur. A confirmer annuellement à l'aide du suivi photogrammétrique
	Chute du bloc A2_3b	20	40		
Masse C3	Chute du bloc C3c	40	100		Un scénario type éboulement en masse de plusieurs centaines de m3 n'est pour le moment pas retenu dans ce secteur. A confirmer annuellement à l'aide du suivi visuel tous les 3 à 5 ans.
Couloir 1	1 scénario type bloc		5	31.7	

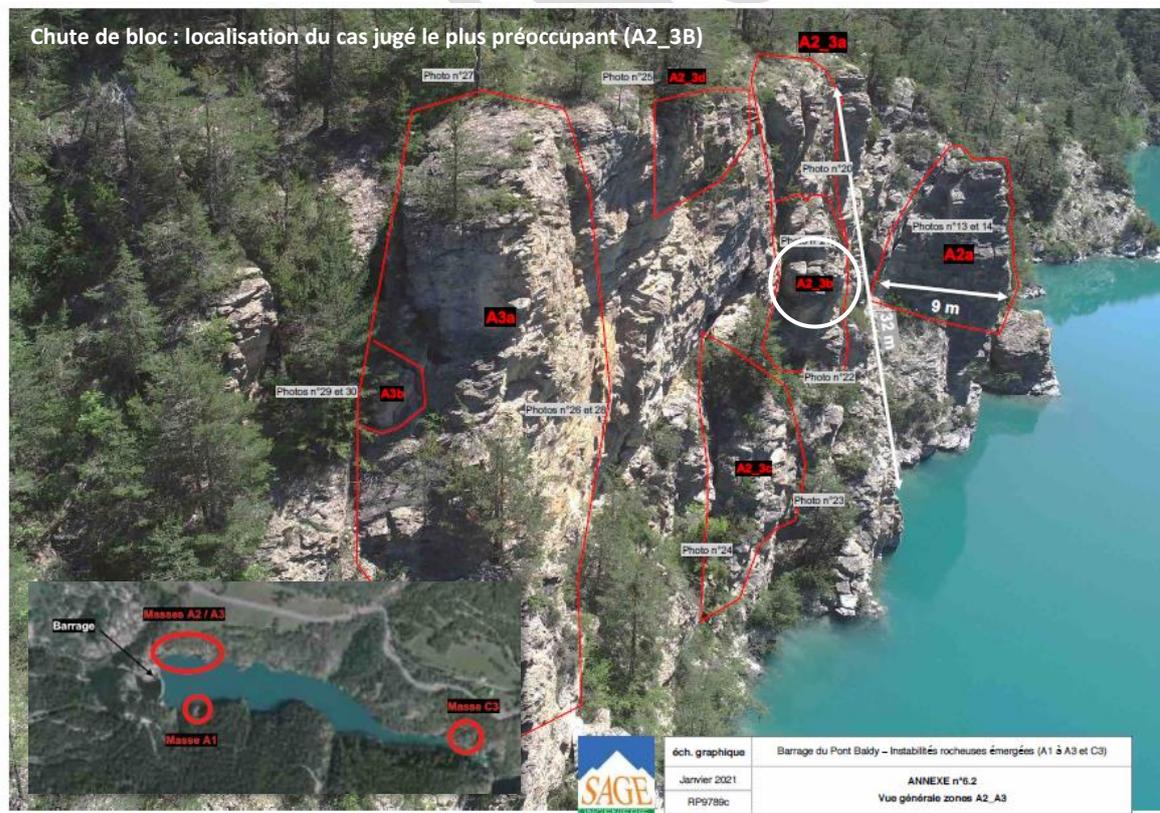


Figure 2 : Scénarios de chutes de blocs

Modélisation

La modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel Flow3D. La géométrie s'est basée sur différentes sources de données bathymétriques et Lidar (cf. illustration ci-dessous).

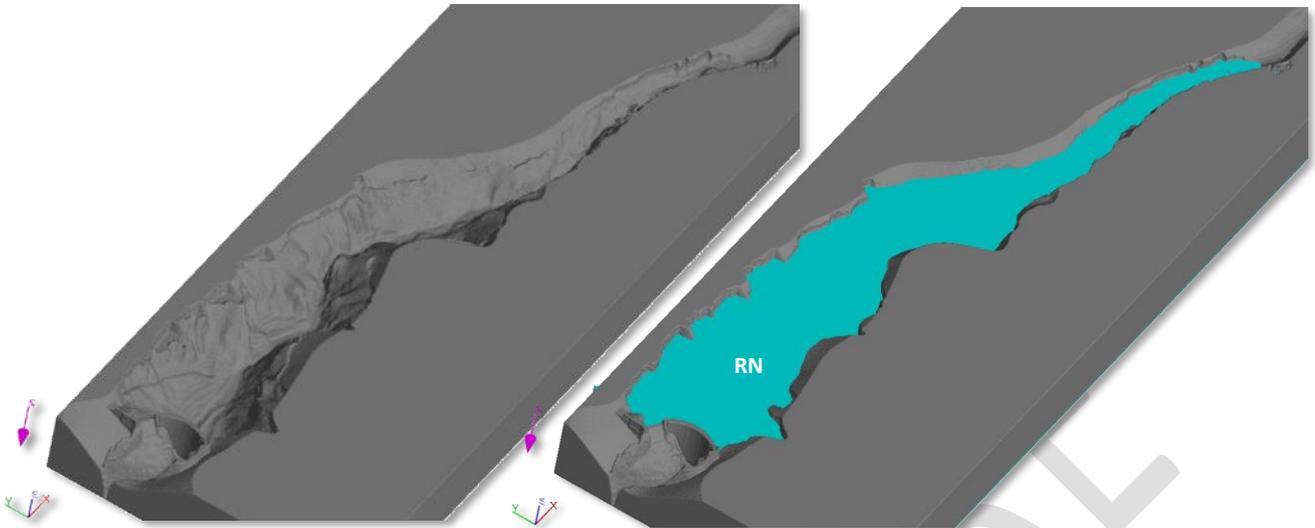


Figure 3 : Géométrie du modèle 3D-CFD du barrage et de la retenue de Pont-Baldy

Le maillage du modèle est caractérisé par des mailles de :

- 0,5 m en plan (axes X et Y),
- 0,25 à 0,5 m en altitude (axe Z).

Le modèle comprend près de 30 millions de mailles. Ce maillage a été choisi afin de décrire suffisamment bien la géométrie de la retenue et du barrage ainsi que les phénomènes de vagues tout en restant compatible avec des temps de calculs raisonnables (de l'ordre de 12 h).

Les conditions initiales et limites ont été définies préalablement :

- Le niveau initial du plan d'eau (RN ou PHE),
- La taille et la forme des blocs (ici supposés, cubiques) ; la densité des blocs a été fixée à 2650 kg/m^3 ; dans le cadre de cette approche, nous n'avons pas eu l'opportunité de mener des tests de sensibilité sur la forme des blocs (plus allongés par exemple) mais cela reste tout à fait réalisable avec Flow3D. Il est également possible d'imposer une rotation initiale à l'objet.
- La vitesse ou la hauteur de chute de ces derniers.

Flow3D permet ensuite de créer un objet mobile caractérisé par la densité des blocs et animé d'une vitesse initiale. Le bloc interagit ensuite avec l'eau au contact de cette dernière.

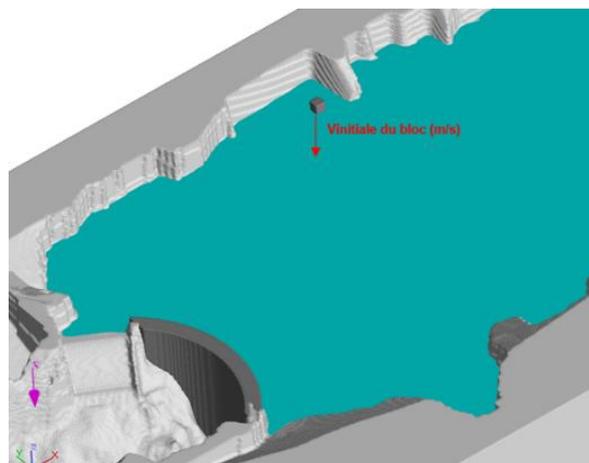


Figure 4 : Conditions limites du modèle Flow3D de Pont-Baldy

Résultats

La chute du bloc A2_3b a été jugée la plus pénalisante en termes de débits et de volumes relâchés à l'aval. Les figures insérées ci-dessous illustrent la propagation de l'onde provoquée par la chute de ce bloc.

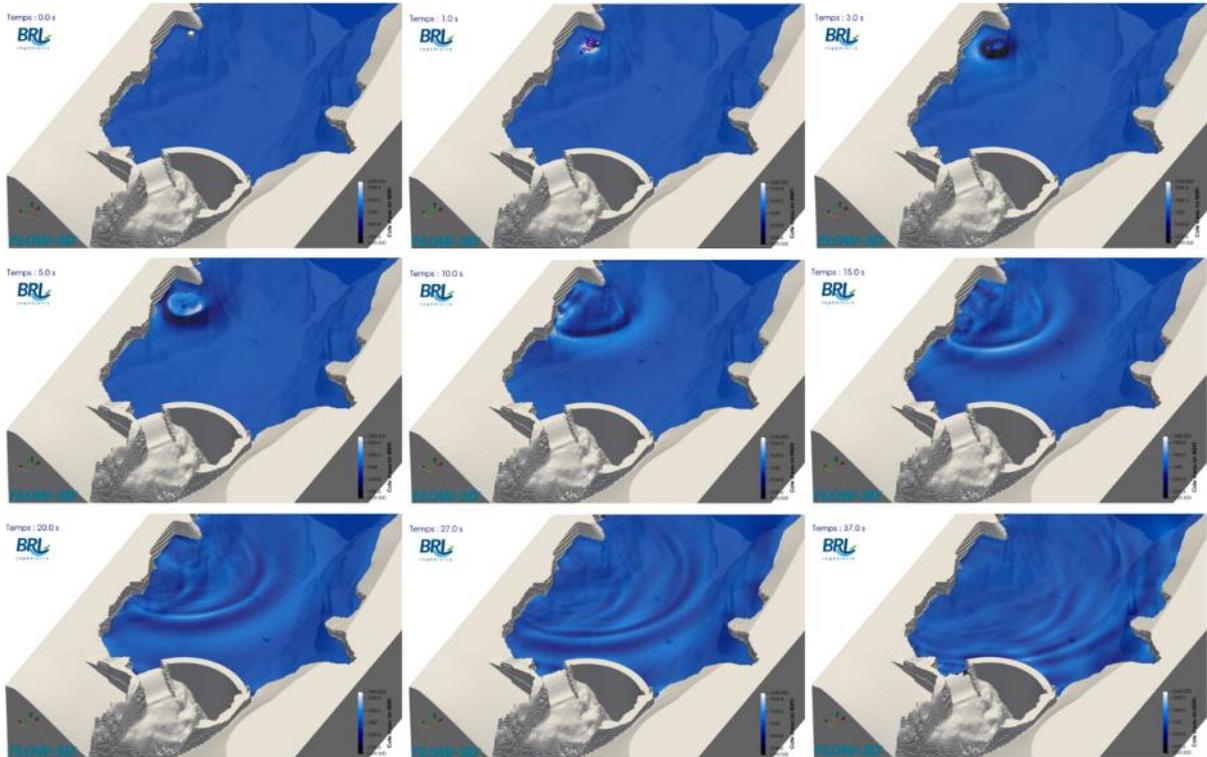


Figure 5 : Barrage de Pont-Baldy - Propagation de la chute du bloc A2_3b

De nombreux points de contrôle de niveaux ont été analysés dans le cadre de ces simulations afin de vérifier la cohérence des simulations et des résultats associés.

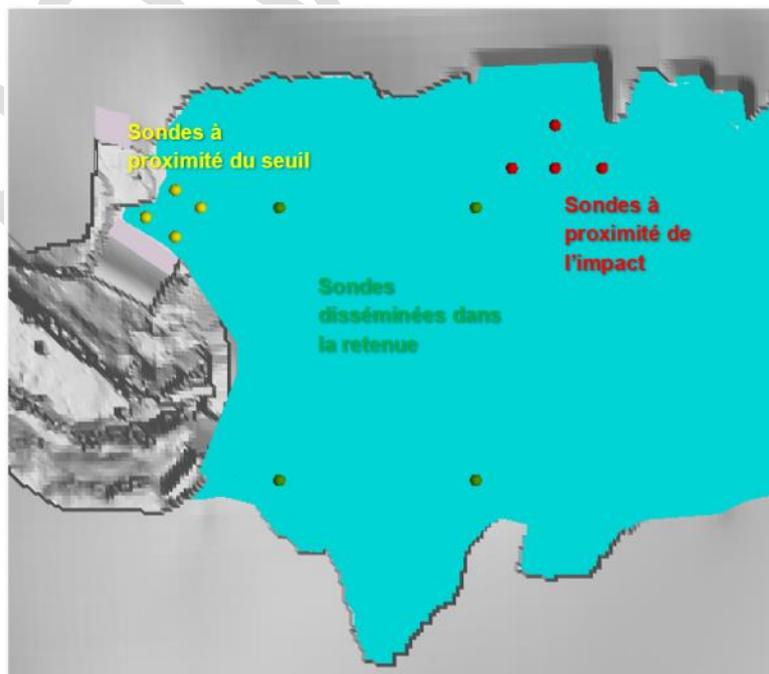


Figure 6 : Barrage de Pont-Baldy – Sondes exploitées dans la modélisation

Les variations de niveaux d'eau au droit de ces sondes sont illustrées pour le cas du bloc A2_3b dans les 40 premières secondes de simulation :

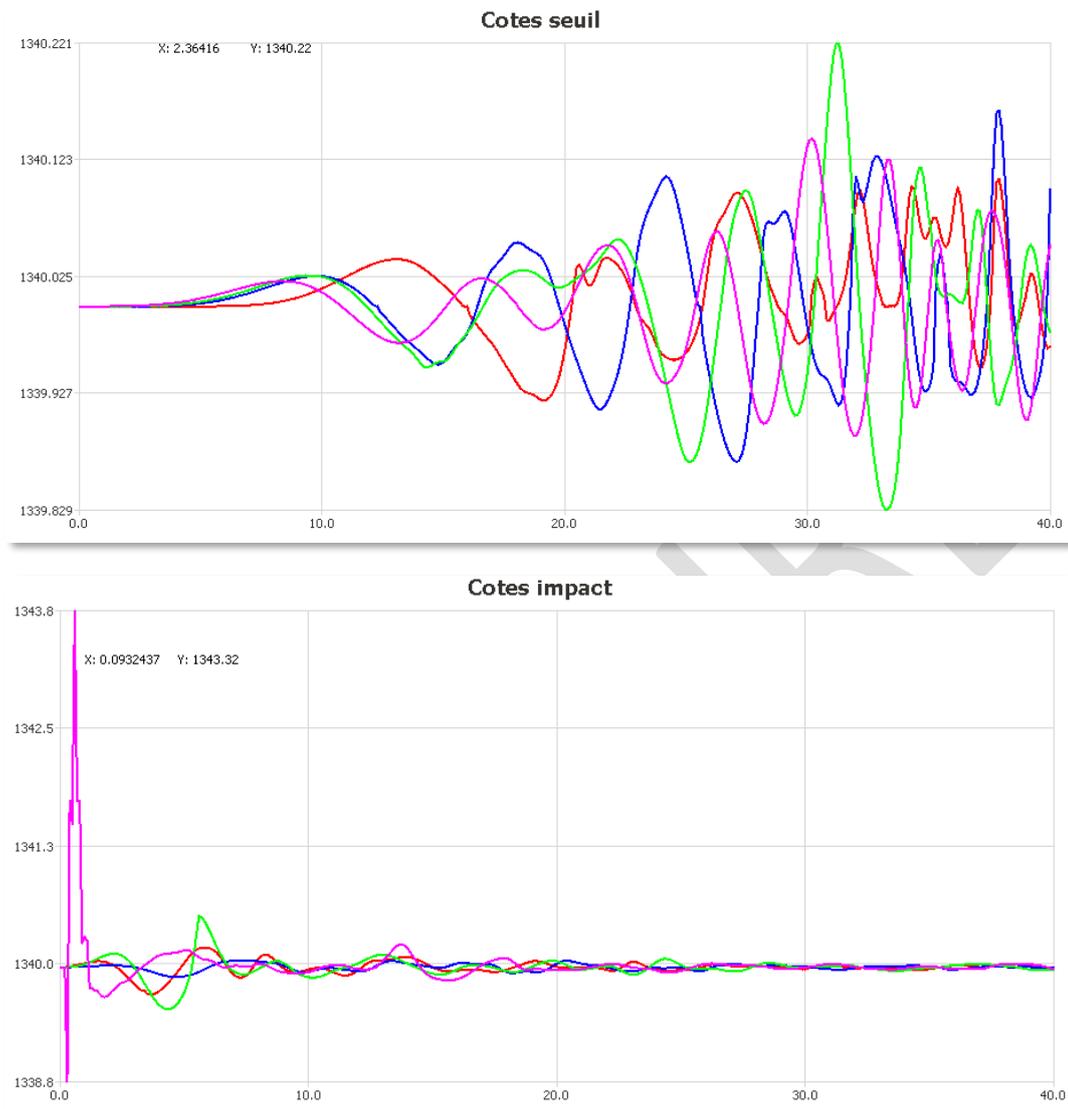


Figure 7 : Barrage de Pont-Baldy, variations des niveaux d'eau au droit des sondes (exemple : bloc A2_3b)

Les résultats des différents cas de figure sont synthétisés dans le tableau ci-dessous :

Scénario								Résultats Flow3D			
Masse	Chute de bloc	Hauteur de chute (m)	Vitesse de chute (m/s)	Angle de chute / horiz.	Volume (m ³)	Forme	Arête (m)	Débit max. EVC (m ³ /s)	Volume surv. EVC (m ³)	Cote max. abords seuil (m NGF)	Débit avec cote max. (m ³ /s)
A2-A3	A3b	35	26.2	90°	3	Cube	1.44	≈ 0	≈ 0	1340.06	0.5
	A2-3b	20	19.8	90°	40		3.42	0.57	≈ 2	1340.22	3.8
C3	C3c	40	28.0	90°	100		4.64	0.06	≈ 2	1340.15	2.1
Couloir 1	Bloc type	51	31.7	45°	5		1.71	0.03	≈ 0	1340.13	1.7

Tableau 1 : Barrage de Pont-Baldy, résultats des simulations

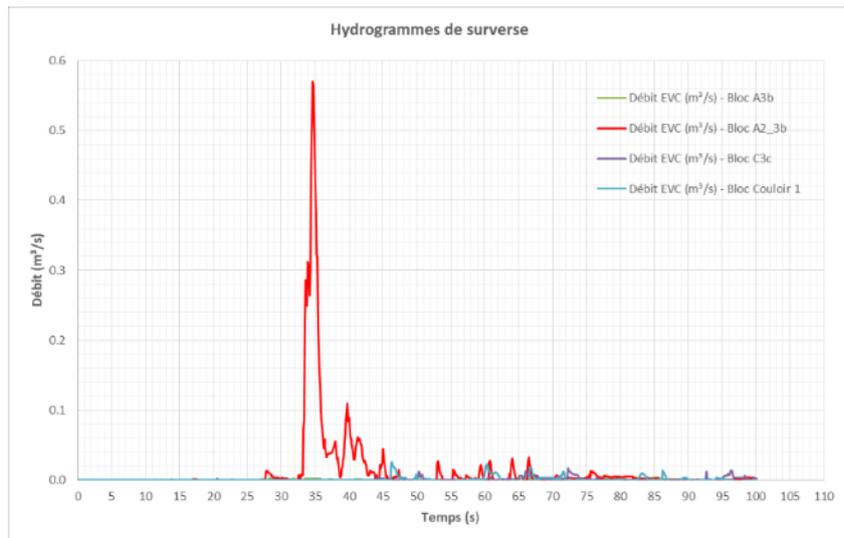


Figure 8 : Barrage de Pont-Baldy, hydrogrammes de surverse sur l'évacuateur de crue

Dans le tableau ci-avant sont figurés :

- Le débit maximal surversé sur l'évacuateur de crue issu des simulations Flow3D,
- Le volume associé à l'hydrogramme de surverse issu de la modélisation,
- La cote maximale enregistrée aux abords du seuil (parmi les 4 sondes du modèle),
- Un débit recalculé avec une loi de seuil sur l'évacuateur avec comme cote amont la cote maximale décrite ci-dessus : il s'agit clairement d'une approche par excès du débit transitant sur le seuil car cette cote n'est pas homogène sur le seuil et varie dans le temps.

On retiendra de ces simulations que le cas le plus pénalisant est celui de la chute du bloc A2_3b qui allie un volume important de 40 m³ et un point de chute relativement proche du barrage.

Cela étant dit, les débits et volumes de surverse sont faibles à très faibles (voire négligeables) pour tous les cas de figure.

Les vagues générées peuvent toutefois être caractérisées par des hauteurs pluri-métriques mais s'atténuent vite lorsque l'on s'éloigne du point d'impact.

Comparaison des résultats avec des approches empiriques

La référence [3] offre une base théorique et des outils d'évaluation des ondes générées par des glissements de terrain ou des avalanches dans des retenues (approches 2D ou 3D). Cette référence a notamment été présentée au congrès du CIGB à Marseille en juin 2022.

En renseignant diverses caractéristiques liées à la retenue et au glissement de terrain (profondeur du plan d'eau, densité et caractéristiques géométriques du glissement, angle et vitesse d'impact...), l'outil permet de calculer un certain nombre de paramètres (cf. figure ci-dessous) :

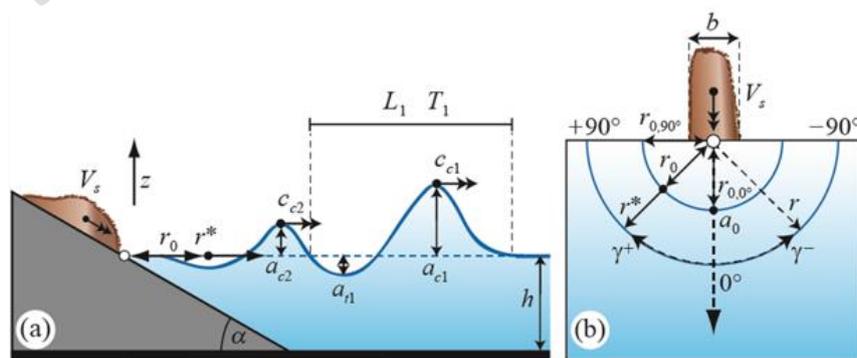


Figure 9 : Schéma de principe de l'onde générée et principaux paramètres calculés (source [3])

L'application de ces formules empiriques a abouti aux résultats suivants (comparés aux résultats issus des simulations Flow3D) :

Scénario								Résultats Flow3D			Résultats Formules empiriques		
Masse	Chute de bloc	Hauteur de chute (m)	Vitesse de chute (m/s)	Angle de chute / horiz.	Volume (m³)	Forme	Arête (m)	Cote max. abords seuil (m NGF)	Période de la 1 ^{ère} vague (s)	Hmax. abords seuil (m NGF)	Cote max. abords seuil (m NGF)	Période de la 1 ^{ère} vague (s)	
AZ-A3	A3b	35	26.2	90°	3	Cube	1.44	1340.06	5.0	0.1 à 0.5	1340.1 à 1340.5	6.9	
	A2-3b	20	19.8	90°	40		3.42	1340.22	5.5	0 à 0.5	1340 à 1340.5	7.1	
C3	C3c	40	28.0	90°	100		4.64	1340.15	15.0	0 à 0.3	1340.0 à 1340.3	17.9	
Couloir 1	Bloc type	51	31.7	45°	5		1.71	1340.13	4.0	0 à 0.5	1340 à 1340.5	6.9	

Tableau 2 : Comparaison des formules empiriques et des résultats Flow3D

En préambule, il est nécessaire de rappeler que ces formules empiriques ont été définies pour des glissements de terrain ou des avalanches et non des chutes de blocs. De fait, plusieurs paramètres calculés s'écartent notablement des domaines de validité des formules. Il faut ainsi analyser avec précaution les résultats de l'application de ces analyses. Cela étant dit, le tableau ci-dessus appelle les commentaires suivants :

- Les périodes de la première vague sont assez homogènes entre les résultats Flow3D et les approches empiriques,
- Les cotes maximales aux abords du seuil calculées avec Flow3D se situent dans la plage estimée avec les formules empiriques (première ou seconde vague, ac1 et ac2),
- Les formules empiriques distinguent assez peu les différents cas de figure étudiés en termes de hauteurs maximales atteintes par les vagues : tous les cas de figure aboutissant à des vagues comprises entre 0,3 et 0,5 m. Il est à noter que, dans le cas d'une chute verticale, les résultats des expériences montrent que les formules données surévaluent l'amplitude des vagues. Concernant la chute de bloc, l'utilisation de ces formules semble donc sécuritaire.

Trajectoires des blocs

Le modèle Flow3D permet d'estimer la trajectoire des blocs qui ont chuté dans la retenue. L'objectif est notamment de savoir s'ils sont susceptibles d'interférer avec les organes hydromécaniques en pied de barrage. Les figures ci-dessous illustrent la position des blocs en fin de simulation pour des cas de figure étudiés.

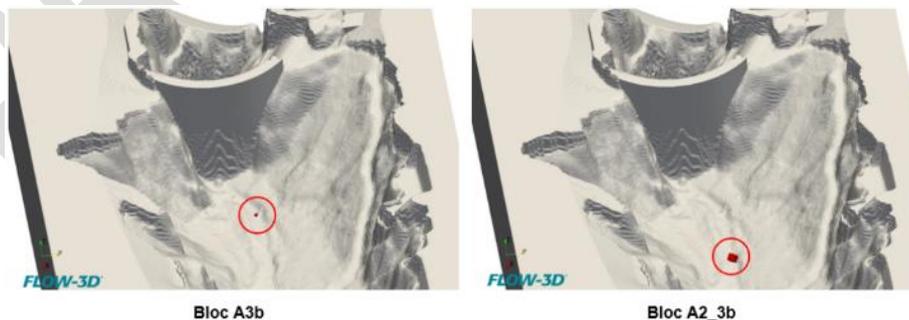


Figure 10 : Position des blocs en fin de simulation (bloc arrêté)

La position des blocs en fin de course ne semblait pas être de nature à gêner la manœuvre des vannes de vidange d'après les simulations 3D. Toutefois, il est nécessaire de garder à l'esprit que ces simulations reposent sur de nombreuses hypothèses :

- Nature et forme des blocs,
- Point de chute,
- Vitesse d'impact et angle d'impact...

Les hydrogrammes ont les caractéristiques suivantes :

- Niveau initial = RN : $Q_{\text{pointe}} = 32,3 \text{ m}^3/\text{s}$ Volume = 375 m^3
- Niveau initial = RN-1m : $Q_{\text{pointe}} = 3,0 \text{ m}^3/\text{s}$ Volume = 10 m^3

Le tableau ci-dessous compare les résultats obtenus au droit du seuil avec les approches empiriques :

Niveau initial du Plan d'eau (m NGF)	Résultats Flow3D		Résultats Formules empiriques		
	Cote max. abords seuil (m NGF)	Période de la 1 ^{ère} vague (s)	Hmax. abords seuil (m NGF)	Cote max. abords seuil (m NGF)	Période de la 1 ^{ère} vague (s)
RN = 1340	1341.30	12 à 15	0.8	1340.80	12.9
RN-1m = 1339	1340.26	12 à 15	0.8	1339.80	12.9

Tableau 3 : Comparaison des formules empiriques et des résultats Flow3D

Les ordres de grandeur des hauteurs de la vague consécutive à l'avalanche aux abords du seuil sont cohérents, de l'ordre de 1 m. Au contact du barrage, les hauteurs maximales atteintes sont également du même ordre de grandeur avec des surcotes de l'ordre de 0,9 à 1,4 m.

Les hydrogrammes surversés ont ensuite été propagés à l'aval à l'aide d'un modèle hydraulique 2D. Pour le cas le plus défavorable à savoir un niveau initial du plan d'eau fixé à la RN, on note un laminage très important de l'hydrogramme de surverse passant en 150 m environ d'un débit de pointe de $32 \text{ m}^3/\text{s}$ à quelques m^3/s (4 à 5). Dans la Cerveyrette et sa traversée de Briançon, le débit de pointe est bien inférieur à $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Ces données ont permis d'évaluer le niveau de gravité des scénarios ayant pour événements initiateurs des chutes de blocs ou avalanches.

3. ETUDE DE CAS : DEFERLEMENT SUR UN PAREMENT MIXTE

3.1.Problématique

Dans le cadre d'étude de dangers de barrage en remblais, vis-à-vis du risque de surverse, les calculs de revanche peuvent se heurter à plusieurs difficultés :

- La présence d'un parement amont mixte avec, par exemple, une partie inférieure composée de rip-rap, et une partie supérieure constituée d'un masque en béton,
- Le barrage est surmonté d'un muret par-vagues.

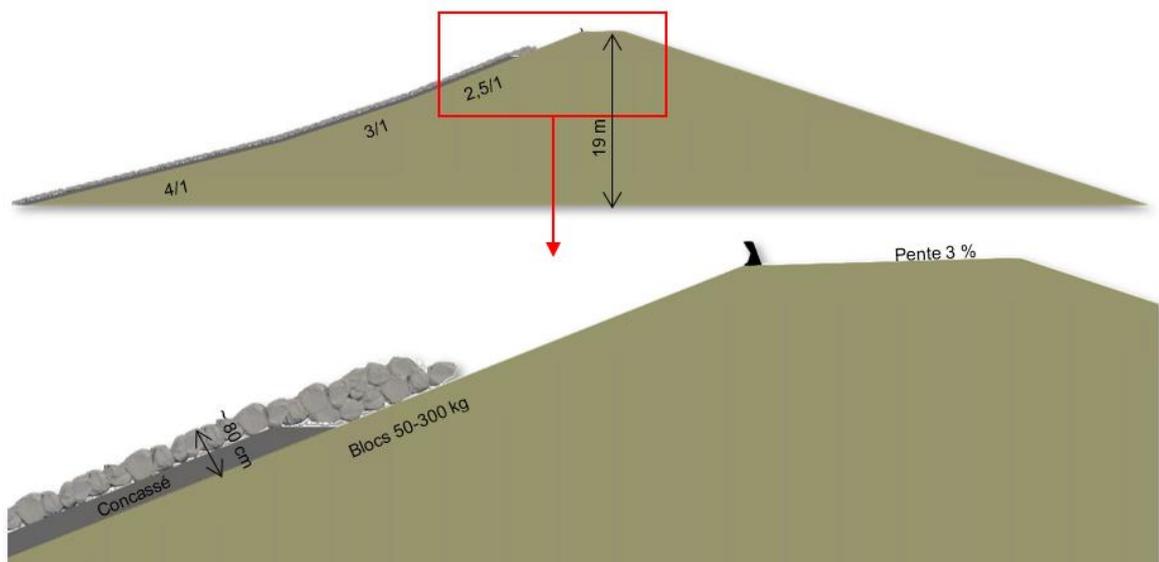


Figure 13 : Coupe-type d'un barrage à parement amont mixte

Dans ce cas de figure, aucune approche empirique (notamment celle proposée dans les préconisations du C.F.B.R. [4]) ne permet de calculer les cotes atteintes et les volumes de franchissement. Il est dès lors très difficile de conclure quant à l'acceptabilité ou non de ces phénomènes dans le cadre d'une EDD.

3.2.Méthodologie

Afin de répondre à ces questionnements, BRLi a mis en œuvre un modèle 3D-CFD spécifique sur une tranche d'1 m (temps de calculs associés de l'ordre de 3 à 6 h) :

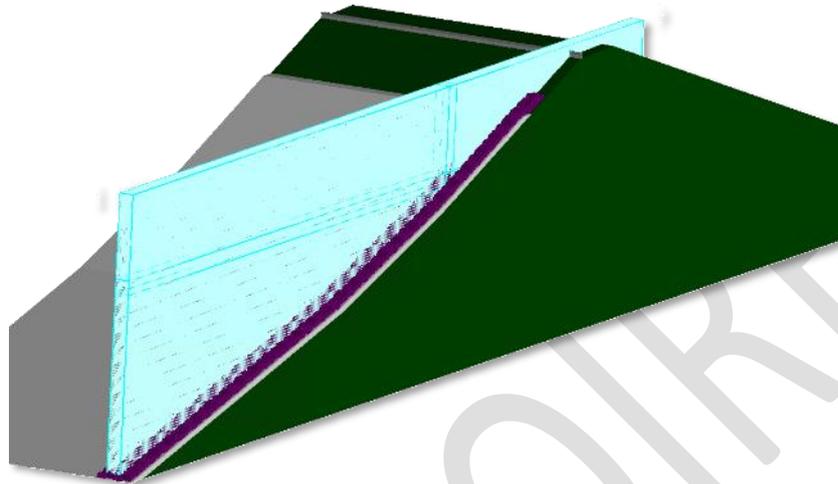


Figure 14 : Modèle 3D-CFD pour un barrage à parement amont mixte

Les conditions limites du modèle ont été constituées par les vagues (calculées à l'aide des formules empiriques préconisées par le C.F.B.R. [4]) et les niveaux suivants :

Ouvrage	Plan d'eau	Vent	Hauteur de la vague (m)	Période du pic spectral (s)
Barrage étudié	RN	T=1000 ans	2,14	4,3
	PHE	T=50 ans	1,67	3,9

Tableau 4 : Vagues simulées

La configuration la plus pénalisante est le cas de figure « **RN + vent 1000 ans** » ; on note des franchissements qui peuvent atteindre **0,1 à 0,2 m³/s/ml**. Pour la configuration « **PHE + vent 50 ans** », les franchissements peuvent être **négligés**. Le graphe ci-dessous illustre les franchissements en m³/s/ml pour la configuration la plus pénalisante :

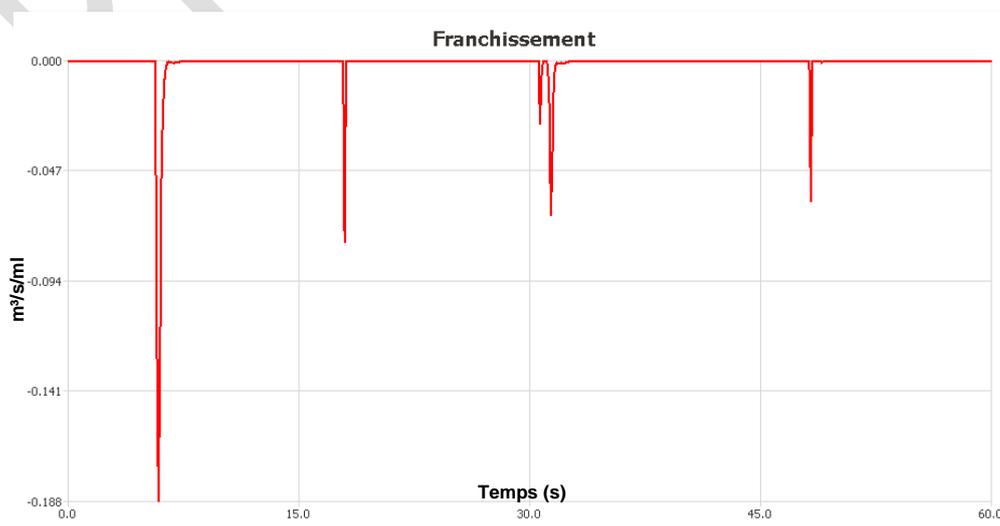
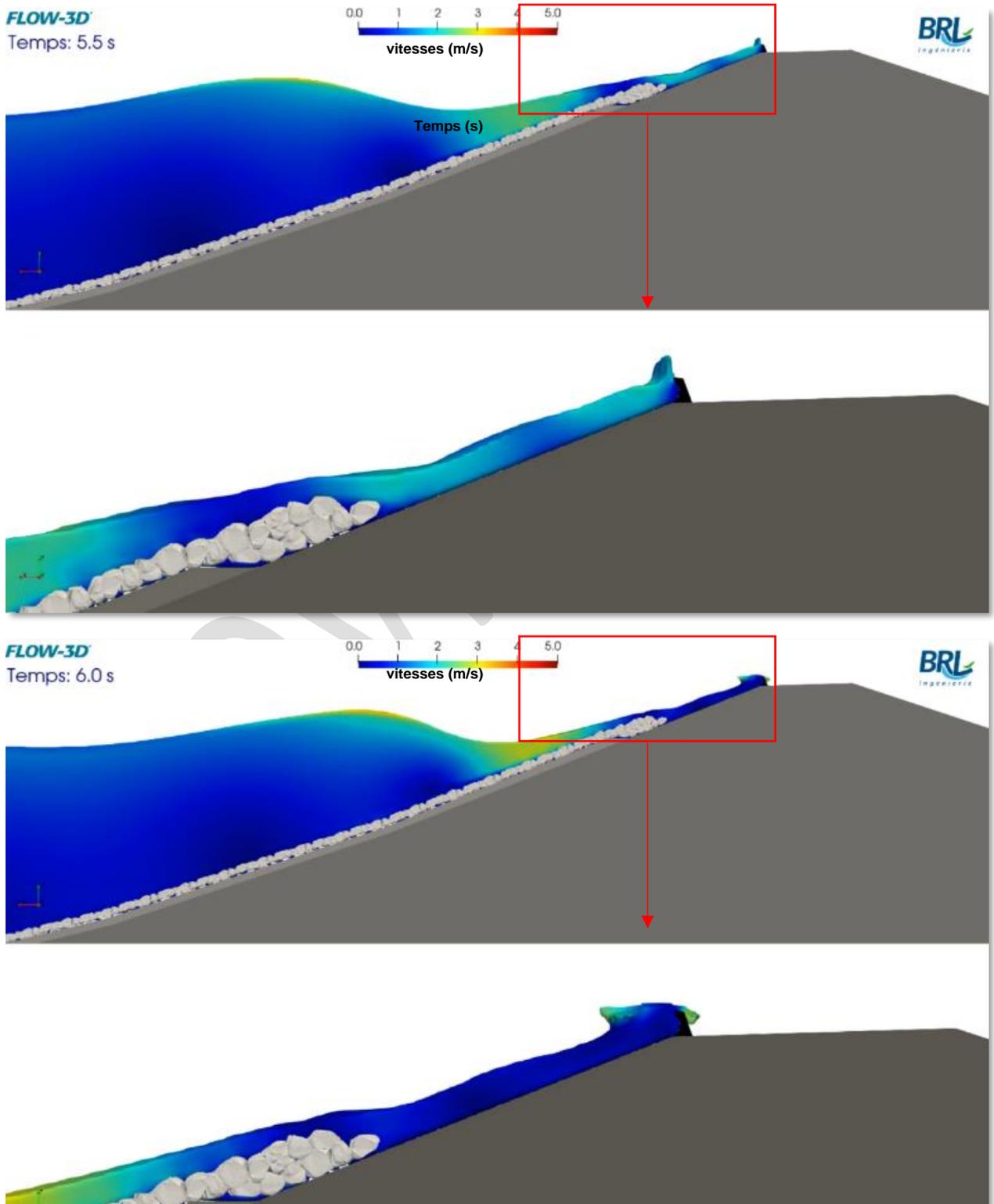


Figure 15 : Exemple pour un barrage : RN + vent 1000 ans

Pour information, dans le cas de figure illustré ci-dessous, l'application simple des consignes C.F.B.R. concluait à :

- L'absence de franchissement en optant pour un parement rugueux,
- Un déferlement métrique au-dessus du parapet en optant pour un parement lisse.

Des extraits de la simulation « RN + vent 1000 ans » sont insérés ci-après. On remarque notamment sur ces extraits de l'animation que le mur pare-vagues joue bien son rôle.



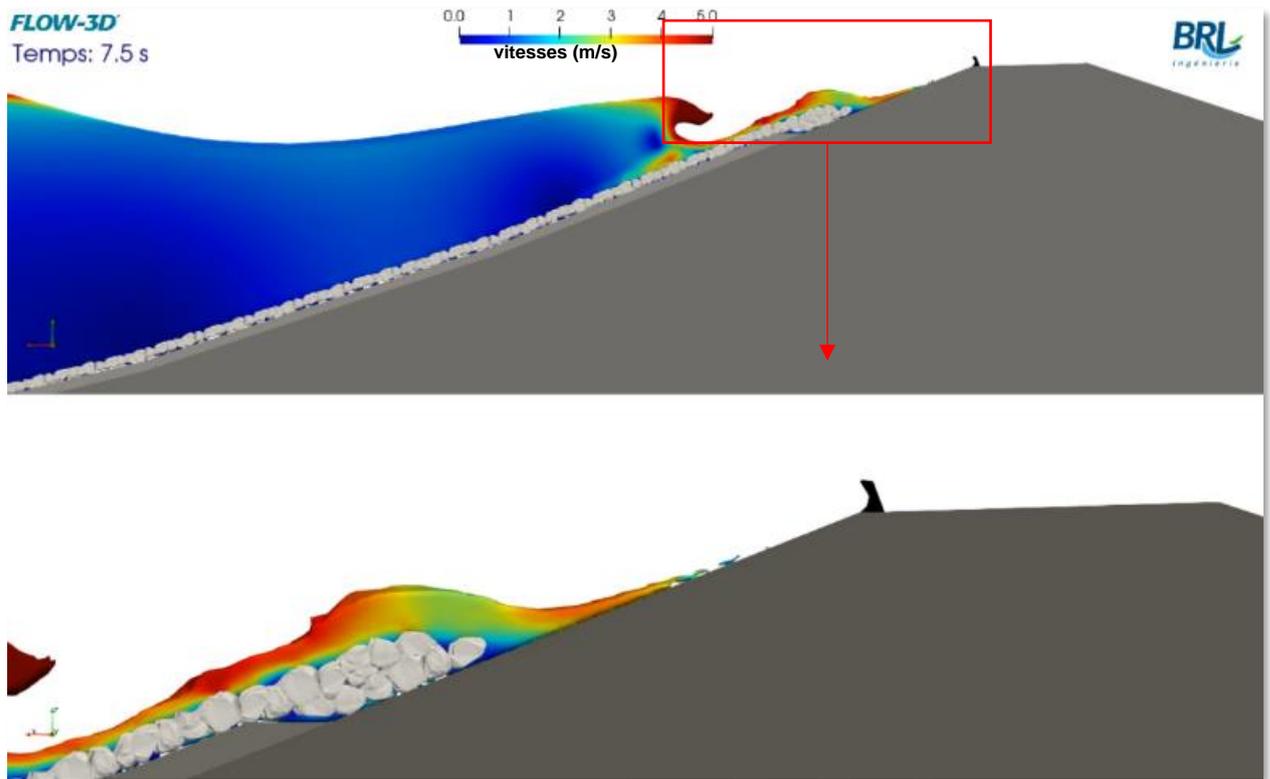


Figure 16 : Vitesses : RN + vent 1000 ans (extraits de la simulation)

De nombreux tests de sensibilité et de cas complémentaires ont été étudiés par la suite. Cette approche, menée dans le cadre plus global d'une analyse de risques qui a pour vocation d'alimenter une EDD, a ainsi permis de conclure que le potentiel de danger associé à ces franchissements pouvait être accepté.

4. LIMITES DE L'EXERCICE ET PERSPECTIVES

L'estimation des incertitudes de calculs numériques est toujours un exercice compliqué. On peut en revanche lister les hypothèses estimées fortes de ces différentes simulations et les différentes perspectives offertes par ces modélisations :

- **Chutes de blocs** : les blocs ont été supposés cubiques ; on pourrait imaginer des blocs plus conformes aux prévisions des BE spécialisés (si tant est qu'il soit possible de le faire) et leur imposer une vitesse mais aussi une rotation initiale,
- **Avalanches** : dans le cas de figure exposé dans cet article, la vague initiale a été estimée à l'aide de formules empiriques et imposée comme condition limite au modèle 3D-CFD ; Flow3D permettrait, moyennant des calculs plus lourds et plus longs, de modéliser directement l'avalanche elle-même,
- **Déferlement de vague sur parement** : les modélisations ont été réalisées sur une tranche de 1 m (assimilable donc à un modèle 2D en XZ) avec comme condition limite les vagues issues des recommandations C.F.B.R. ; on pourrait imaginer un modèle 3D-CFD complet de la retenue avec comme conditions limites des données de vent.

5. CONCLUSION

Les outils de modélisation (hydrauliques 3D-CFD notamment) aujourd'hui à la disposition des ingénieurs permettent de mieux appréhender, comprendre et estimer les dangers potentiels liés aux barrages.

Les phénomènes de vagues (transitoires, complexes par essence et souvent tridimensionnels) peuvent ainsi être traités de manière plus détaillée que par la simple application d'abaques ou de formules empiriques.

Pour les cas exposés dans cet article, ces approches ont ainsi permis d'évaluer plus finement les hydrogrammes de franchissement qui couplés à la simulation de la propagation en aval de ce volume d'eau ont permis d'en évaluer plus justement le niveau de gravité.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Barrage de Pont-Baldy : Étude du risque de submersion du barrage par une vague provoquée par avalanche ou chute de blocs (SAFEGE-IMSRN-SIERRA NEIGE 2014)
- [2] Barrage de Pont-Baldy : Étude géotechnique G2 AVP pour sécurisation des masses rocheuses émergées A1, A2, A3 et C3 (SAGE Ingénierie 2021)
- [3] Ondes générées par les glissements de terrain dans les réservoirs (Frederic M. Evers, Valentin Heller, Helge Fuchs, Willi H. Hager und Robert M. Boes – VAW-ETH Zurich 2019)
- [4] Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages (juin 2013, C.F.B.R.)