

Les

références

ANALYSE DES RISQUES DES PONTS EN SITUATION DE CRUE



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

ANALYSE DES RISQUES DES PONTS EN SITUATION DE CRUE



Collection « Les références »

Cette collection regroupe l'ensemble des documents de référence portant sur l'état de l'art dans les domaines d'expertise du Cerema (recommandations méthodologiques, règles techniques, savoir-faire...), dans une version stabilisée et validée. Destinée à un public de généralistes et de spécialistes, sa rédaction pédagogique et concrète facilite l'appropriation et l'application des recommandations par le professionnel en situation opérationnelle.

REMERCIEMENTS

Cet ouvrage, œuvre collective du Cerema, a été piloté par Denis Davi (Cerema).

Ont contribué à sa rédaction :

- Grégory Boré (Cerema),
- Pauline Caulet (Cerema),
- Pierre Corfdir (Cerema),
- Denis Davi (Cerema),
- Bertrand de Bruyn † (Cerema),
- Sébastien Defaux (Cerema),
- Jean-Michel Lacombe (Cerema),
- Émilie Leprêtre (Cerema),
- Sébastien Neiers (Cerema),
- Jean Renault (Cerema).

Comment citer cet ouvrage :

Cerema. *Analyse des risques des ponts en situation de crue.*

Bron : Cerema, 2023.

Collection : Les références.

ISBN : 978-2-37180-619-1 (pdf)

Ce document a fait l'objet d'une relecture croisée au sein du groupe de rédaction, ainsi que d'une validation générale par Pierre Corfdir, responsable du secteur d'activité Gestion des patrimoines d'ouvrages d'art du Cerema.

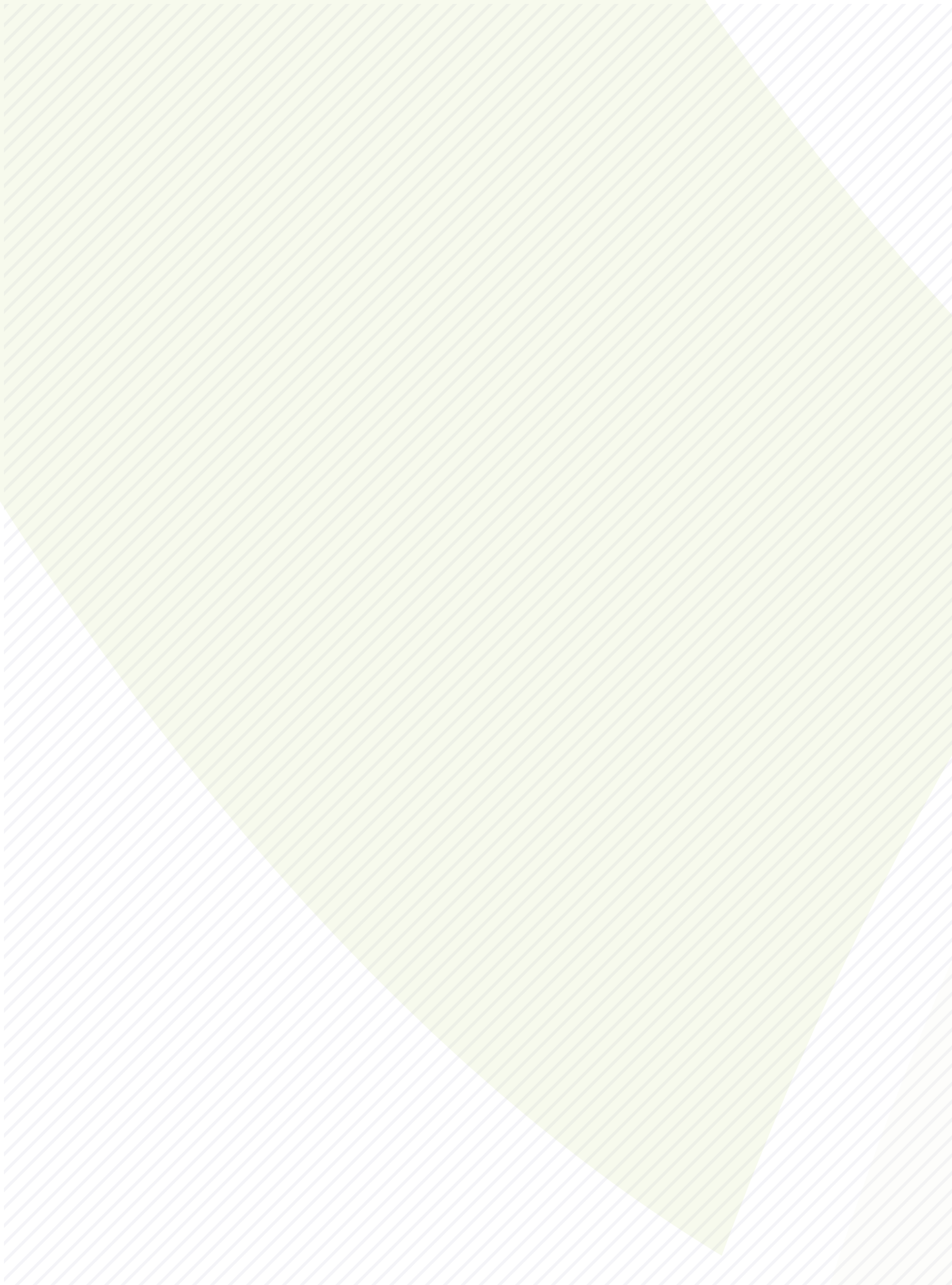
La méthodologie proposée a été développée à partir d'une étude opérationnelle d'analyse des risques des ponts du réseau structurant d'Île-de-France en situation de crue, menée pour le compte de la Préfecture de Police de Paris en lien avec la Direction Interdépartementale des Routes d'Île-de-France.

CRÉDITS PHOTOS

Couverture : iStock/Kim Willems.

ILLUSTRATIONS

Cerema sauf mention contraire.



Sommaire

Remerciements	2
Introduction	6
CHAPITRE 1	
Méthodologie d'analyse des risques des ouvrages en situation de crue	9
1.1 - Principes de la méthode	10
1.2 - Identification des aléas et description du système d'évaluation	12
1.3 - Évaluation de la vulnérabilité	51
1.4 - Évaluation de la criticité	74
1.5 - Évaluation du risque	76
CHAPITRE 2	
Recommandations générales pour les ouvrages présentant un risque élevé	81
2.1 - Recommandations vis-à-vis du risque « affouillement »	82
2.2 - Recommandations vis-à-vis du risque « poussée des eaux »	84
2.3 - Recommandations vis-à-vis du risque « choc de bateau »	84
Bibliographie	85
Annexes	87
Annexe 1 - Construction d'une base de données	88
Annexe 2 - Détermination de la masse des ouvrages en fonction de leur typologie	91

Introduction

La gestion des crues majeures des rivières constitue une préoccupation essentielle à la fois pour les acteurs de la gestion des risques (services de l'État et des collectivités territoriales, syndicats de bassins) et pour les gestionnaires des ouvrages qui franchissent ou longent ces cours d'eau. Les crues qui impactent le territoire national, en métropole comme en outre-mer, rappellent régulièrement la prégnance de cet aléa, dont l'intensité et la fréquence ont tendance à augmenter du fait des effets du changement climatique. Face aux enjeux considérables en termes de protection de la population et de maintien de l'activité économique, il est apparu essentiel d'évaluer la vulnérabilité routière face aux crues majeures et plus particulièrement d'analyser la résistance des ponts face aux diverses agressions subies en période de crue (poussée des eaux, affouillement, embâcles, chocs de bateaux à la dérive).

Afin de répondre à ces enjeux, le Cerema a mobilisé une équipe pluridisciplinaire. La problématique de la résistance des ouvrages en cas de crue est en effet complexe et multiple, car elle croise plusieurs aléas :

- l'action hydrodynamique du courant sur les piles en rivière qui peut s'exercer à un niveau supérieur à celui envisagé lors de sa construction et avec une vitesse accrue ;
- l'action de creusement du courant au niveau des sols de fondations en période de crue qui peut occasionner des affouillements et fragiliser les appuis des ouvrages ;
- l'action de navires en avarie ou d'embâcles qui peut entraîner des chocs ou des poussées hydrodynamiques supplémentaires sur les piles ou sur le tablier.

De nombreux sinistres illustrent les conséquences possibles de ces actions :

- la passerelle des Arts à Paris, fragilisée par des chocs dus à des barges, s'effondre en 1979 sur 60 mètres ;
- plusieurs arches du pont Wilson à Tours s'écroulent en 1978 par suite d'un affouillement ;
- le pont de la rivière Saint-Étienne à la Réunion est ruiné en 2007 lors de crues torrentielles ;
- nombreux ouvrages endommagés suite au passage de la tempête sur la Guadeloupe le 16 septembre 2022.

Face à ces aléas, les structures des ouvrages développent des capacités de résistance, qui dépendent de leur conception, et notamment de la nature des matériaux utilisés (ductiles ou non), du type de fondation (superficielle ou profonde), de la structure du tablier (poutres ou caisson), des exigences réglementaires de l'époque de construction sur la prise en compte des aléas évoqués.

L'objectif de ce guide est de décliner la démarche générale d'analyse des risques développée par le Cerema depuis plusieurs années [1], au cas particulier des ponts en situation de crue. Il propose une méthode pragmatique et efficace de recensement et de classement des ouvrages les plus sensibles. L'analyse des risques permet d'analyser un patrimoine important d'ouvrages à partir d'un nombre réduit de paramètres facilement accessibles pour les gestionnaires, tout en garantissant une représentativité suffisante des phénomènes considérés. Le niveau de risque évalué au travers de cette méthodologie résulte du croisement entre la probabilité d'occurrence d'un événement (ici la fréquence et l'intensité des crues et des phénomènes agressifs qui en résultent pour l'ouvrage), la sensibilité de l'ouvrage vis-à-vis de ces phénomènes et la gravité des conséquences de sa défaillance. Le but de cette méthode est ainsi d'améliorer la connaissance des ouvrages concernés par la situation de crue étudiée et de les hiérarchiser en fonction du risque potentiel de défaillance qu'ils présentent.

Ce guide complète le guide [Analyse de risques des ponts en site affouillable](#) publié par le Cerema en 2019 [4] par l'extension de son champ d'application à l'analyse d'autres phénomènes induits par les crues des rivières sur les ouvrages qui les franchissent : poussées hydrodynamique et hydrostatique de l'eau, chocs de bateaux à la dérive... Il s'adresse aux gestionnaires d'ouvrages d'art et d'infrastructures de transport et plus largement aux différents acteurs responsables de la gestion des risques et de la résilience des territoires (collectivités, sociétés d'autoroutes, services déconcentrés de l'État, gestionnaires de réseaux ferroviaires, bureaux d'études).



CHAPITRE 1

**Méthodologie
d'analyse des risques
des ouvrages
en situation de crue**

MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE DES RISQUES DES OUVRAGES EN SITUATION DE CRUE

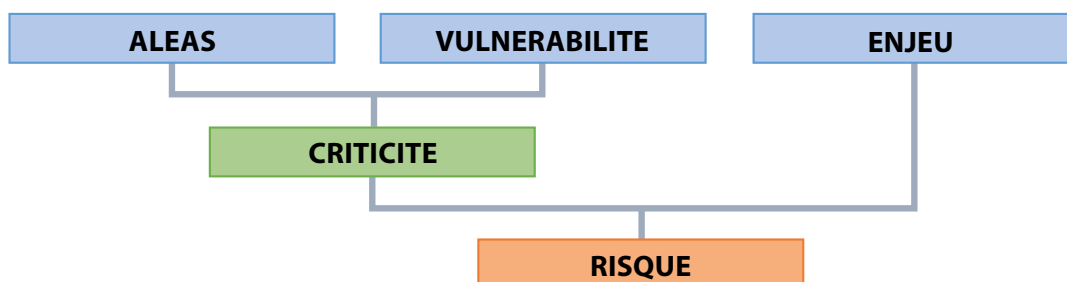
1.1 - PRINCIPES DE LA MÉTHODE

La méthode d'analyse des risques repose sur l'évaluation du trio aléa-vulnérabilité-conséquences (cf. Guide du Séttra, *Maîtrise des risques – Application aux ouvrages d'art*, publié en 2013 [1]) :

- **L'aléa** correspond au phénomène à l'origine du risque, qui peut se produire ou non au cours de la vie de l'ouvrage. Dans notre cas, l'aléa principal envisagé est la situation de crue (phénomène externe d'origine naturelle). Celui-ci va être à l'origine d'aléas secondaires explicités dans la suite.
- **La vulnérabilité** de l'ouvrage correspond à sa sensibilité vis-à-vis de l'aléa considéré.
- **Les conséquences** ou encore **l'enjeu** comptabilisent les dommages directs à la fin de l'événement. Les conséquences sont qualifiées par différents paramètres et notamment par les impacts qui résulteraient de la défaillance de l'ouvrage sur l'exploitation de la route et sur la sécurité des riverains et des usagers (effondrement de tout ou une partie de la structure, déformations importantes de la structure, perte des équipements de sécurité, etc.).

La combinaison des facteurs aléa et vulnérabilité permet d'évaluer **le danger** aussi appelé **criticité**, i.e. la probabilité de défaillance de l'ouvrage. Par la suite, la combinaison de la criticité avec le facteur enjeu permet d'évaluer le niveau de **risque** de l'ouvrage, cf. figure 1.

Figure 1 : Détermination du risque

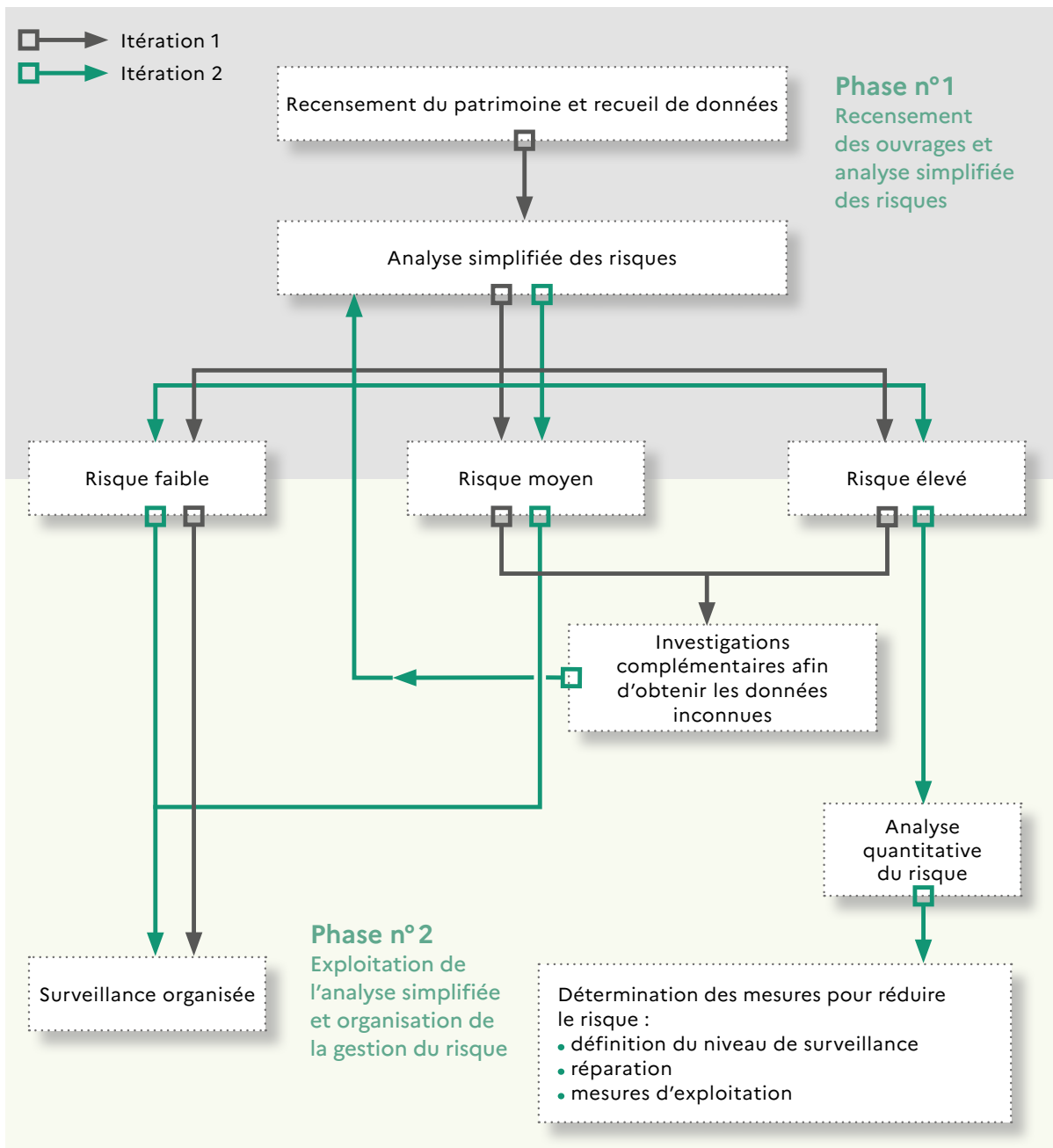


L'analyse comporte en général deux phases :

- La première phase consiste à recenser les différents ouvrages existants puis les données relatives disponibles, afin de mener l'analyse simplifiée des risques aboutissant à un classement en 3 catégories de risques de ces ouvrages (risque faible, risque moyen, risque élevé). Cette phase correspond à l'étude proposée dans ce guide.
- La seconde phase est ensuite menée pour les ouvrages présentant un niveau de risques important, on parle de gestion du risque. Cette phase nécessite alors le recueil d'informations plus précises et quantitatives sur les ouvrages concernés (prélèvements sur site, sondages, essais en laboratoire, visite de l'ouvrage par du personnel qualifié, recherche d'archives, examen des dossiers d'ouvrages s'ils existent) et peut conduire à une analyse plus fine et/ou au recalcul détaillé de l'ouvrage et à sa mise sous surveillance.

La figure 2 donne une description générale de la méthodologie d'analyse des risques menée.

Figure 2 : Description générale de la méthodologie d'analyse des risques menée, tirée du guide *Analyse des risques des ouvrages en remblai renforcé relevant de la technologie « Terre Armée »* [2]



Il est important de garder à l'esprit que l'analyse des risques reste un outil d'aide à la gestion d'un patrimoine. Elle a pour but d'aider le gestionnaire à prioriser les actions à mener sur certains ouvrages, principalement ceux dont la défaillance peut entraîner des risques socio-économiques majeurs.

Le présent guide se focalise essentiellement sur la phase 1 (analyse simplifiée des risques). S'agissant plus spécifiquement de la problématique affouillement, la démarche présentée est très largement inspirée de celle du guide *Analyse de risques des ponts en site affouillable* publié par le Cerema en 2019 [4].

1.2 - IDENTIFICATION DES ALÉAS ET DESCRIPTION DU SYSTÈME D'ÉVALUATION

L'aléa principal étudié ici est l'aléa « crue » à l'origine d'aléas secondaires que sont :

- l'aléa « affouillement » ;
- l'aléa « poussée des eaux » ;
- l'aléa « choc de bateau ».

Pour chacun de ces aléas secondaires, plusieurs critères sont définis et évalués. Les sous-parties suivantes traitent des différents aléas retenus pour cette démarche et donnent le détail de la mise en place du système d'évaluation.

1.2.1 - PHÉNOMÈNE DE CRUE ET DONNÉES HYDROLOGIQUES REPRÉSENTATIVES

Le phénomène de crue traduit un fort accroissement du débit et/ou de la hauteur d'eau en écoulement d'un fleuve, d'une rivière, d'un cours d'eau. Plus ou moins rapide (on parle selon le temps de montée inférieur à 2 heures, compris entre 2 et 12 heures ou supérieur à 12 heures respectivement de crue soudaine, rapide ou lente), ce phénomène provoque dans la plupart des cas le débordement du lit mineur du cours d'eau et son extension plus ou moins prononcée dans le lit majeur, voire dans les cas d'inondations les plus extrêmes une sortie du lit.

La crue survient souvent après de fortes pluies en amont dans le bassin-versant, plus rarement lors de la fonte des neiges. Le niveau d'aléa lié à la crue est généralement quantifié par :

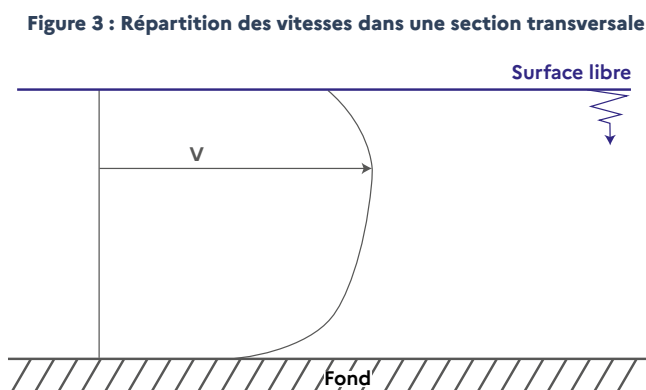
- sa fréquence ou période de retour : on parle par exemple de crue décennale, centennale ou millénaire ;
- sa durée ou temps de montée des eaux : de quelques minutes à plusieurs jours ;
- sa vitesse d'augmentation, sa soudaineté de réalisation en un lieu donné ;
- son ampleur : dépassement des niveaux historiquement connus et son extension spatiale ;
- sa vitesse de propagation le long du cours d'eau ou onde de crue.

Les zones inondées par les crues, plus particulièrement dans les zones habitées, sont désormais bien répertoriées en France, notamment par les plans de prévention du risque inondation lorsqu'ils existent.

Parmi les différents paramètres physiques ou données hydrologiques représentatifs des phénomènes (ou aléas secondaires) pouvant impacter directement les ouvrages de franchissement que sont les ponts et qui seront détaillés dans les paragraphes suivants, **la vitesse d'écoulement** et **la hauteur maximale de la ligne d'eau** sont les plus déterminants.

1.2.1.1 - Caractérisation de la vitesse de l'eau

Dans la section en travers d'un cours d'eau, la vitesse de l'eau n'est pas uniforme. Cette dernière est nulle sur les berges et au fond, et maximum vers le milieu de la section, au 2/3 environ de la hauteur d'eau (cf. figure 3).



De plus, la vitesse est également variable dans le temps. La caractérisation de la vitesse en un point d'une section correspond ainsi souvent à une moyenne sur un quart d'heure de mesures. La mesure intégrée dans le temps et dans une section des vitesses instantanées de l'eau va ensuite permettre d'évaluer le débit de ladite section. Ce débit sert ici à déterminer une vitesse pertinente utilisée dans l'évaluation des risques.

1.2.1.2 - Sources de données

Les informations recueillies afin d'estimer les vitesses de l'eau au droit des ouvrages peuvent être de différentes natures :

- **données historiques** : rapports, analyses et documentations relatifs aux crues emblématiques du bassin ;
- **note de calcul des appuis**, si ces derniers ont fait l'objet d'un dimensionnement vis-à-vis de la poussée hydrodynamique ou des affouillements ;
- **résultats de modèles hydrauliques** fournis par les Services de Prévision des Crues ou disponible dans les Plan de Prévention des Risques inondation (PPRi). Notamment, les hauteurs maximales de la ligne d'eau et les débits (voire hydrogramme) pour des crues de référence sur les cours d'eau lorsqu'elles sont disponibles (e.g. crue centennale - Q_{100}) ;
- **données hydrologiques** issues des services hydrométriques de l'État et accessibles sur Internet – vigicrue et banque HYDRO (débit moyen, module, débit des crues de référence, etc.) ;
- **niveaux d'eau « moyen » ou retenue normale**, évalués à partir des informations VNF et des profils en long IGN ;
- **données bathymétriques** récentes des parties naviguées des cours d'eau fournies par les Directions Territoriales de Bassins de VNF.

Les rapports et analyses précédents contiennent des informations de toutes natures permettant de déterminer la valeur des débits de référence sur chaque tronçon homogène de cours d'eau. Ils fournissent également parfois des valeurs de vitesses mesurées pendant certaines crues, utilisables comme éléments de comparaison et/ou de validation.

Les modèles hydrauliques numériques monodimensionnels (1D) estiment la hauteur d'eau en des points prédéfinis (maillage) en propageant un débit (chronique de débits). Ils utilisent pour cela la géométrie du cours d'eau (profil en travers, sections mouillées, périmètre mouillé) et sont calés suivant des événements (crues) connus. Une table des mailles permet ensuite de géo-référencer l'ensemble des points où sont calculées les cotes de l'eau. Ainsi, ces modèles hydrauliques permettent de propager le débit et d'estimer les hauteurs d'eau en de nombreux points des principaux cours d'eau. Les modèles hydrauliques numériques bidimensionnels permettent d'estimer, en plus, la vitesse (orientation et amplitude) de l'eau.

Les données bathymétriques correspondent en général à des informations numériques de position et d'altitude. Les données les plus complètes correspondent à un ensemble de fichiers de points, avec pour chaque fichier, environ 300 000 points cotés couvrant environ 1,5 km de cours d'eau. Dans le cas des données fournies par VNF, les relevés bathymétriques ne vont pas au-delà de la berge à la retenue normale de navigation. Dans certains cas, elles se limitent même au chenal de navigation.

1.2.1.3 - Méthode d'estimation retenue

La méthode d'estimation des vitesses retenue pour une section en travers données repose sur l'évaluation du rapport du débit et de la surface mouillée de la section en travers (section perpendiculaire à l'écoulement).

■ Débit (Q) :

Les débits sont estimés à partir de la bibliographie disponible. Les valeurs des débits correspondant à la **crue centennale (Q_{100})** sont retenues sur chaque tronçon comme valeurs de référence pour l'analyse des risques (la crue centennale est celle qui a une chance sur cent de ne pas être dépassée pour une année donnée). La crue centennale est une information en général aisée à trouver ou à évaluer. De plus l'occurrence retenue, 1 (mal-)chance sur 100 chaque année est acceptable pour de nombreux ouvrages d'art.

Lorsqu'il existe plusieurs bras de rivières, les débits doivent être répartis. Plusieurs méthodes sont possibles, les plus sophistiquées s'appuient sur un modèle hydraulique adapté, les plus rustiques répartissent les débits en fonction de la largeur apparente des bras.

Les méthodes permettant d'estimer les débits de référence sont en général fondées sur des lois statistiques ajustées (la loi de Gumbel est souvent utilisée) selon les crues connues. L'estimation est convenable lorsque l'on dispose d'une chronique d'un tiers de la période de retour recherchée (30 ans de données pour une période de retour de 100 ans). Par ailleurs, il est considéré qu'un débit décennal est estimé par la mesure avec une incertitude de l'ordre de 10 %. Dans le cas d'une crue centennale, cet ordre de grandeur est également considéré bien qu'optimiste.

À défaut, on pourra appliquer les relations suivantes extraites du guide *Sétra Cours d'eau et ponts* [3] permettant de déduire du débit décennal les débits de fréquence d'occurrence inférieure :

- $Q_{25} = 1,2 Q_{10}$
- $Q_{50} = 1,5 Q_{10}$
- $Q_{100} = 2,0 Q_{10}$

■ Surface mouillée (Ah) d'une section en travers :

La surface mouillée d'une section en travers donnée (section perpendiculaire à l'écoulement) est la surface d'eau comprise dans cette section (m²).

Les surfaces mouillées sont estimées à partir des données bathymétriques disponibles et d'un calcul hydraulique (hauteur d'eau calculée à des mailles proches par un modèle hydraulique numérique par exemple). Lorsque cela est possible, un profil en travers du fond est établi pour chaque ouvrage.

Une méthode pour estimer la surface mouillée d'une section en travers d'un profil complexe consiste à discrétiser le profil en portions de largeur régulière (2 m de largeur par exemple) et à attribuer à chaque portion une cote bathymétrique réaliste (la cote bathymétrique la plus proche ou la moyenne des cotes bathymétriques les plus proches).

La surface de la section mouillée est alors obtenue par intégration de la cote du profil par rapport à la cote de l'eau. La cote de l'eau correspond à la hauteur d'eau au droit de chaque pont, évaluée par interpolation linéaire en fonction de la distance des cotes d'eau fournies aux mailles proches d'un modèle hydraulique (ce mode d'estimation est justifié par la faible pente de la surface libre, de l'ordre de 10 cm/km pour le débit centennal Q_{100}).

Cette manière de procéder permet d'ôter les piles du pont de la section mouillée et minimise la section mouillée en considérant des profils verticaux au niveau des berges.

1.2.1.4 - Estimation des vitesses pour le périmètre d'étude

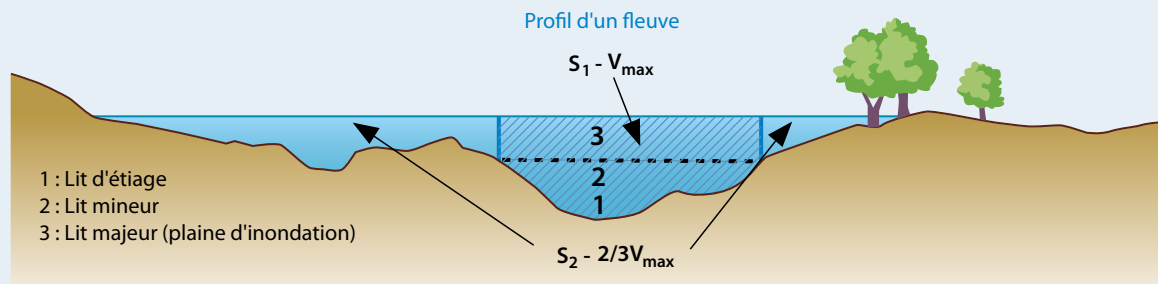
Aux sections en travers, la vitesse (V) est estimée à partir du débit (Q) et de la surface mouillée (Ah), telles que :

$$V = Q/A_h$$

On pourra alors considérer en première approche que la vitesse est réduite de 1/3 au-delà du lit mineur des rivières « fluviales » notamment du fait d'une rugosité plus importante (liée par exemple à la végétation) et au niveau des ouvrages de décharges (pas de réduction pour les rivières « torrentielles »). Ainsi, on peut résoudre l'équation :

$Q_{100} = V_{\max} \times S_1 + 2/3 V_{\max} \times S_2$ avec S_1 et S_2 les sections d'écoulement respectivement au niveau des limites du lit mineur et au-delà de ces limites :

Figure 4 : Hypothèse simplifiée de réduction de la vitesse d'écoulement au-delà du lit mineur



Nota : L'approche ci-dessus atteint ses limites dans le cas de rivières fluviales à très large plaine d'inondation, pour lesquelles la vitesse a tendance à diminuer plus rapidement lorsque l'on s'éloigne du lit mineur. Dans un tel cas, on restreindra la section S_2 à une distance d'environ 50 m de part et d'autre du lit mineur.

Lorsqu'un ou des modèles hydrauliques sont disponibles dans le périmètre d'étude, les informations recherchées (section en travers, vitesse « débitante », vitesses locales (modèles multifilaires ou modèles 2D)) peuvent souvent être directement extraites ou déduites des modèles.

1.2.2 - ALÉA « AFFOUILLEMENT »

Plusieurs critères d'aléa sont définis afin d'évaluer le niveau d'aléa « affouillement » (faible, moyen, élevé) :

- conditions d'écoulement (vitesse du courant) ;
- nature du fond du lit (évaluation de l'affouillement général) ;
- débouché hydraulique (effet de contraction du lit au droit de l'ouvrage) ;
- obstacles à l'écoulement et évolutions du lit (évaluation de l'affouillement local).

La définition de chaque critère nécessite alors la connaissance d'un certain nombre de données et paramètres explicités dans la suite.

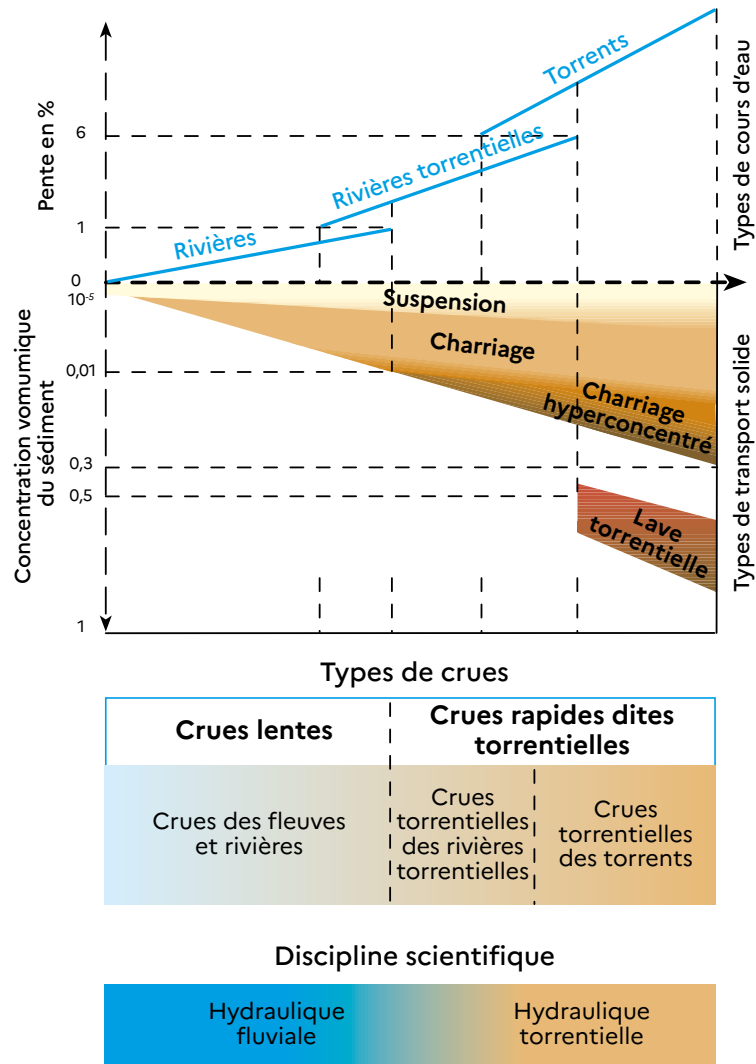
■ Conditions d'écoulement (vitesse du courant) :

La vitesse d'un cours d'eau peut varier de manière très sensible en fonction des configurations locales (largeur, coudes, pente, etc.) et du tracé des rivières. Vis-à-vis du risque « affouillement », la donnée relative à la vitesse d'écoulement au droit de la zone d'étude, pour le scénario de crue considéré, constitue une des données d'entrée principales. Cette donnée n'est cependant pas toujours facile à obtenir en pratique.

À défaut d'informations quantitatives disponibles suffisantes telles que détaillées au paragraphe précédent, les équivalences suivantes, extraites du guide *Sétra Cours d'eau et ponts* [3] peuvent être appliquées (figure 5) :

- pour **les rivières fluviales** (pente inférieure à 1 %) : les vitesses d'écoulement naturel pour une crue centennale peuvent atteindre, dans le lit mineur, 3 à 4 m/s, avec des phénomènes de charriage peu concentré. Pour la Seine à Paris, cette vitesse est de l'ordre de 2 m/s sous crue centennale ;
- pour **les rivières torrentielles** (pente comprise entre 1 % et 6 %) : les vitesses d'écoulement naturel pour une crue centennale peuvent atteindre, dans le lit vif, 6 à 7 m/s, avec des phénomènes de charriage concentré ;
- pour **les torrents de montagne** (pente supérieure à 6 %) et **les rivières sous régime cyclonique des départements, régions et collectivités d'outre-mer (DROM-COM)** : les vitesses d'écoulement naturel pour une crue centennale peuvent dépasser 6 à 7 m/s, avec des phénomènes de charriage hyperconcentré et de laves torrentielles. Pour le pont de la rivière Saint-Étienne, on estime que la vitesse moyenne d'écoulement a pu atteindre des valeurs de l'ordre de 12 m/s.

Figure 5 : Types de cours d'eau, mécanismes de transports solide et types de crues, en rapport avec la pente du lit et la concentration de la charge solide [3]



Nota : Dans le cas particulier du littoral, en dehors de la Méditerranée, pour les rivières fluviales en milieu estuarien (pente très inférieure à 1 %) : les écoulements dus aux marées (en absence de crue) peuvent aussi atteindre, dans le lit mineur, 3 à 4 m/s, dans les deux sens d'écoulement (amont ↔ aval).

Sur la base de ces éléments, la détermination de la vitesse d'écoulement se fait de la manière suivante :

- **si donnée disponible :** la valeur de vitesse d'écoulement naturel maximal (référence : crue centennale) en amont du franchissement V_{max} (m/s) est renseignée. Cette vitesse correspond à la vitesse moyenne d'écoulement sur la « tranche » d'eau (section en travers) considérée (ou intégrale du profil de vitesse sur la hauteur d'eau en un point donné de la largeur du lit) ;
- **à défaut :** la pente moyenne p (%) du fond de lit, au niveau de la zone de franchissement, est utilisée afin de calculer la vitesse d'écoulement :

$$\begin{aligned}
 -V_{max} \text{ (m/s)} &= 3 && \text{si } p < 1 \% \\
 -V_{max} \text{ (m/s)} &= 3+(6-3)*(p-1)/(6-1) && \text{si } 1 \% < p < 6 \% \\
 -V_{max} \text{ (m/s)} &= \min(p ; 10) && \text{si } p > 6 \%
 \end{aligned}$$

Nota : L'information relative à la définition de la pente du fond de lit peut le cas échéant être déduite de la bathymétrie, en considérant **une distance de l'ordre de 50 à 100 m** en amont de l'ouvrage. En effet si une pente régulière est plus propice à l'augmentation de la vitesse d'écoulement, une variation locale de pente peut également influencer fortement sur cette dernière (notion de « rapides »).

• **à défaut :** la catégorie de cours d'eau peut également être utilisée si la pente moyenne du fond du lit n'est pas connue :

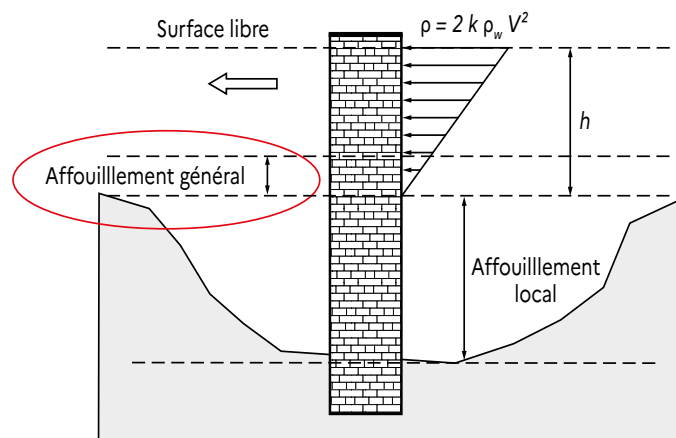
- **rivières fluviales** : rivières de plaine, rivières aménagées ou navigables, rivières fluviales en milieu estuarien (hors Méditerranée) soumis à la marée : $V_{max} = 3$ m/s ;

- **rivières torrentielles** (notamment rivières méditerranéennes) : $V_{max} = 6$ m/s ;

- **torrents de montagne et rivières sous régime cyclonique des DOM** : $V_{max} = 10$ m/s.

■ **Nature du fond du lit (évaluation de l'affouillement général) :**

Figure 6 : Représentation schématique de l'affouillement général, NF P94-262 [8]



Pour le calcul de l'affouillement général (cf. figure 6), la vitesse critique (V_c en m/s) provoquant le début de mise en mouvement (par charriage) est estimée à partir de ([3]) :

$$V_c = 6 y^{1/6} D_{50}^{1/3}$$

Avec « y » : la hauteur d'eau moyenne (en situation de crue) en amont du pont (en m) ;

D_{50} : le diamètre de grain médian des matériaux constitutifs du lit (en m), représentatif des premiers mètres. À défaut, des valeurs égales aux limites hautes suivantes (cf. Norme NF P94-056 [5]) peuvent être adoptées selon la nature des sols constitutifs du fond de lit :

- $D_{50} = 0,2$ mm, pour des sables fins ;
- $D_{50} = 2$ mm, pour des sables grossiers ;
- $D_{50} = 20$ mm, pour des graviers ;
- $D_{50} = 200$ mm, pour des cailloux et galets ;
- $D_{50} = 1\,000$ mm, pour des blocs.

Si $V_{max} < V_c$ ou substratum rocheux affleurant, aucun affouillement général n'est considéré ;

Si $V_{max} > V_c$, la profondeur d'affouillement général est évaluée à partir de la formule (sécuritaire) de Ramette [6], revenant à considérer l'épaisseur de matériaux mise en mouvement :

$$P_1 = 0,73 q^{2/3} / d^{1/6} - y$$

Avec, $q = Q/L$: le débit liquide par unité de largeur L du lit du cours d'eau (en m^2/s), soit $q = V_{max} \cdot y$;
 d : le diamètre moyen (en m) des sédiments, pris égal à D_{50} en 1^{re} approximation.

Nota : Certains sols cohérents de type argiles, limons consolidés, marnes ou craies ne sont en théorie pas affouillables au sens technique du terme, du fait de leur cimentation liée aux forces d'attractions intergranulaires (force électrique, force de Van Der Waals, etc.), qui influencent leur comportement en leur assurant une certaine stabilité intrinsèque. Ces sols présentent en revanche un caractère plus ou moins érodable en fonction de leur niveau de compacité ou de dureté, ainsi qu'en fonction de la forme, de l'angularité ou de l'effet de surface des grains. Pour ce type de sols, la taille unitaire des grains constitutifs n'est donc pas représentative du phénomène de creusement étudié ici. À défaut d'études d'érodabilité plus précises, on rapprochera leur comportement de celui des sables grossiers, ce qui devrait constituer dans la plupart des cas une hypothèse sécuritaire.

Pour la caractérisation de la nature du sol constitutif du fond de lit des rivières, de nombreuses données géotechniques facilement accessibles de la base de données BSS (Banque du Sous-Sol) sur InfoTerre (visualiseur de données scientifiques du BRGM – Bureau de Recherches Géologiques et Minières) peuvent être mises à profit. Cette base contient un grand nombre de données de sondages, brutes ou retraitées, qui permettent, pour un certain nombre de ponts, de déterminer une coupe géotechnique approximative.

La connaissance de la coupe géotechnique au droit des ouvrages est une information essentielle dans le cadre de l'évaluation de l'aléa « affouillement ». En effet, les matériaux affouillables sont essentiellement des matériaux alluvionnaires de type granulaires tels que les graviers et sables de toutes granulométries. A contrario, les terrains durs rocheux, marneux et plus généralement présentant une cohésion significative, ne sont pas susceptibles d'être affouillés. Les argiles font ainsi partie de cette catégorie, même si elles n'ont pas la « dureté » d'une roche, car leur cohésion fait qu'il ne peut s'y développer de phénomène d'affouillement, au sens de la mise en suspension de particules de sols, sous l'effet du courant et des turbulences. Néanmoins, ces argiles peuvent subir une certaine érosion – plus intense en période de crue – qui, au fil des ans, peut aboutir à une perte d'épaisseur. Ce phénomène induit un certain dégarnissage lent et progressif des fondations, mais sans comparaison avec le phénomène d'affouillement proprement dit pouvant se développer sur plusieurs mètres de hauteur et de manière rapide dans des terrains granulaires.

Ainsi, il apparaît important de pouvoir identifier et positionner (en altitude) les couches non affouillables de sols, de manière à ne pas surestimer les hauteurs d'affouillement potentielles. Or ces hauteurs sont souvent déduites de calculs valables pour des sols affouillables homogènes, qui ne prennent donc pas réellement en compte la nature complexe des sols, hormis par l'introduction d'une taille des grains.

Enfin, en cas de sol constitué de grains de natures / tailles différentes (ex : limons/graviers), il est proposé de retenir la nature du plus gros matériau (assimilé au « squelette » du sol).

■ Débouché hydraulique (effet de contraction du lit au droit de l'ouvrage) :

Pour tenir compte de l'effet de contraction du lit au droit de l'ouvrage (cf. figure 7), la formule de Laursen [6] est utilisée :

$$y_2/y_1 = (Q_2/Q_1)^{6/7} \cdot (W_1/W_2)^{k1} \quad \text{et} \quad P_2 = y_2 - y_0$$

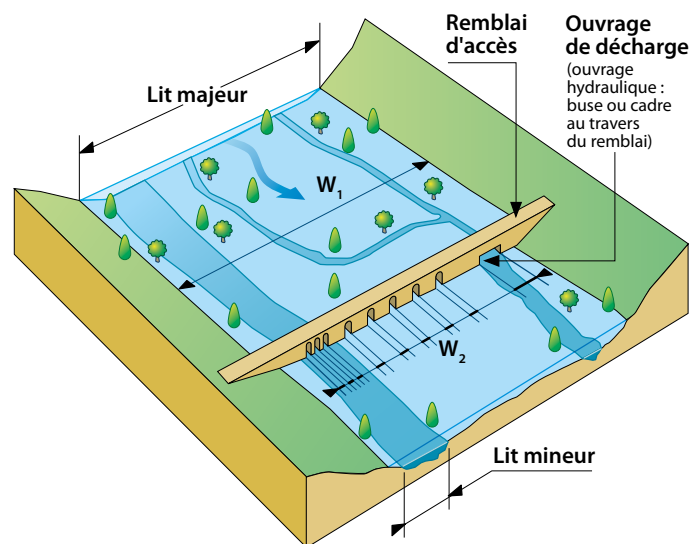
Avec, y_2 : la profondeur moyenne de l'écoulement après l'affouillement dans la section contractée (en m) ;
 y_1 : la profondeur moyenne de l'écoulement dans le chenal en amont du pont au début de la contraction (en m) ;
 y_0 : la profondeur existante dans la section contractée au droit du pont avant l'affouillement (en m) ;
 Q_1 : le débit dans chenal à la section en amont (en m^3/s) ;
 Q_2 : le débit dans chenal à la section contractée (en m^3/s) ;
 W_1 : la largeur du fond du lit en amont du pont (en m) ;
 W_2 : la largeur du fond du lit dans la section contractée moins les largeurs des piles (en m) ;
 k_1 : le coefficient dépendant du mode de transport du matériau dans le lit, défini dans le tableau 1.

Tableau 1 : Valeurs du coefficient k_1 d'après Arneson et al., 2012 [7]

V^*/ω	k_1	Mode de transport des matériaux du lit
< 0,5	< 0,59	Charrage des sédiments en contact avec le fond du lit
0,5 – 2,0	< 0,64	Sédiments transportés par saltation
> 2,0	0,69	Sédiments transportés en suspension

$V^* = (\tau_0/\rho)^{1/2} = (g \cdot y_r \cdot S_r)^{1/2}$ = vitesse de cisaillement de la section amont (en m/s)
 ω = vitesse de chute du matériau basée sur le D_{50} (en m/s)

Figure 7 : Exemple de contraction du lit due à la présence des piles et de la disposition des culées en saillie



En première approximation, à débit et profondeur d'écoulement constants sur la zone impactée (réduction de largeur compensée uniquement par une augmentation de la vitesse d'écoulement, conduisant à $Q_2 = Q_1$ et $y_1 = y_0 = y$), et en considérant une valeur moyenne de k_1 égale à 0,64, indépendamment du mode de transport du matériau dans le lit, les équations ci-dessus se simplifient de la manière suivante :

$$P_2 = y \cdot [(W_1/W_2)^{0,64} - 1]$$

Nota : Pour l'évaluation de la largeur W_z , on s'intéresse ici à la **réduction de la section d'écoulement** du lit majeur. La largeur d'appui à considérer est donc celle qui règne sur la plus grande partie de la hauteur mouillée (en général la largeur des fûts de pile).

■ **Obstacles à l'écoulement et évolutions du lit (évaluation de l'affouillement local) :**

Pour le calcul de l'affouillement local au droit des appuis (cf. figure 8), le principe de la formule de l'université du Colorado [6] est utilisé :

$$P_3 = 2 K_1 K_2 K_3 K_4 a^{0,65} y^{0,35} Fr^{0,43}$$

Avec, y : la hauteur d'eau en amont de la pile (en m) ;

K_1 : le facteur de correction de la forme de la pile ;

K_2 : le facteur de correction pour l'angle d'attaque de l'écoulement ;

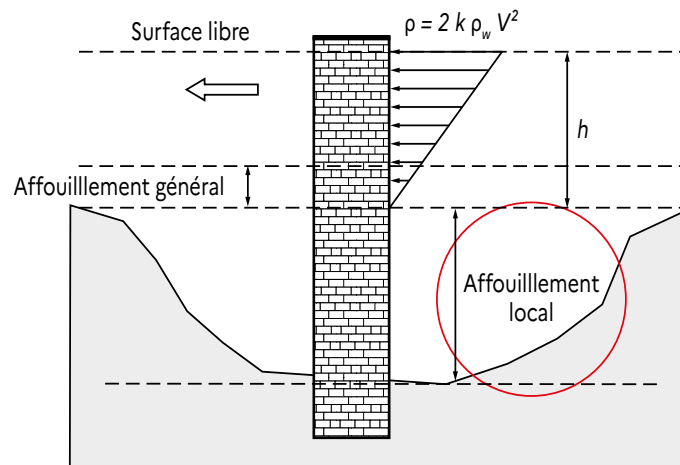
K_3 : le facteur de correction de la forme du lit ;

K_4 : le facteur de correction de pavage du lit en fonction de la taille des grains ;

a : l'épaisseur du fût de pile (en m), ou largeur de semelle si celle-ci est apparente, ou partie de culée en saillie le cas échéant ;

Fr : le nombre de Froude en amont de la pile = $V_{max}/(g.y)^{1/2}$ avec $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ l'accélération de la pesanteur.

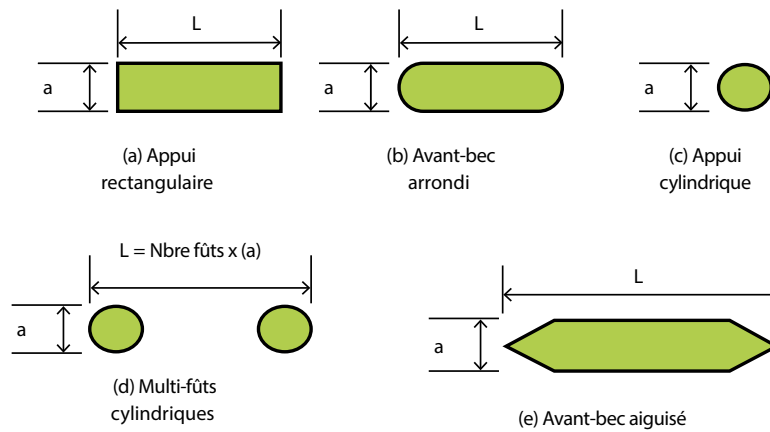
Figure 8 : Représentation schématique de l'affouillement local



Le facteur de correction K_1 dépend directement de la forme de la pile (cf. figure 9). Il est pris égal à :

- 1,0 pour des piles de forme circulaire ou cylindrique ;
- 1,1 pour des piles de forme rectangulaire ;
- 0,9 pour des piles munies d'un avant-bec « aiguisé ».

Figure 9 : Forme des piles les plus communes (Arneson et al., 2012 [7])



Le facteur de correction K_2 , pour l'angle d'attaque de l'écoulement θ , est calculé à partir de l'équation suivante :

$$K_2 = \left(\cos\theta + \frac{L}{a} \cdot \sin\theta \right)^{0,65}$$

Avec L la largeur du fût de pile. Le tableau 2 donne le détail de la détermination des différents paramètres nécessaires au calcul de K_2 .

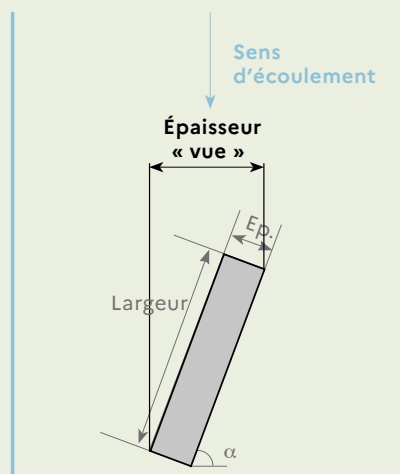
Tableau 2 : Détermination du facteur de correction K_2 d'après Arneson et al., 2012 [7]

Angle	$L/a = 4$	$L/a = 8$	$L/a = 12$
0°	1,0	1,0	1,0
15°	1,5	2,0	2,5
30°	2,0	2,75	3,5
45°	2,3	3,3	4,3
90°	2,5	3,9	5,0

Notas :

- L'épaisseur « a » de même que la forme de l'appui à considérer ici correspondent à la partie « apparente » de l'appui au niveau du fond de lit, donc la **semelle si elle est dégarnie (y compris l'épaisseur des palplanches le cas échéant), le fût sinon**. Ce peut également être la **partie d'une culée en saillie** dans le lit majeur. À noter qu'une section rectangulaire, si elle est orientée de manière à présenter l'angle (ou la pointe) au courant, est à renseigner comme munie d'un avant-bec aiguisé ;
- dans le cas d'un fût de forme oblongue, l'angle d'attaque de l'écoulement θ se définit comme l'angle entre l'axe courant (= orientation moyenne des berges) et l'axe des appuis (piles), avec comme convention $\theta = 0^\circ$ quand l'axe des piles est parallèle à l'axe d'écoulement du courant). Deux options sont néanmoins possibles, qui aboutissent au même résultat :
 - Option 1 (privilégiée) : a = épaisseur « géométrique » et $\theta =$ angle effectif entre l'axe de la pile et l'axe d'écoulement du courant ($\theta = 90^\circ - \alpha$) sur la figure 10 ci-dessous extraite du guide Cerema Analyse de risques des ponts en site affouillable [4] :

Figure 10 : Pile de forme oblongue ou allongée associée à un biais de nature à augmenter sensiblement la surface d'obstacle vue



- Option 2 : a = épaisseur « vue » et $\theta = 0^\circ$.

Sauf lorsque le lit est étroit et parfaitement endigué, il est en outre recommandé de **majorer forfaitairement l'angle θ de 15°** pour tenir compte de la variabilité de l'orientation du courant en fonction du régime de crue.

Le facteur de correction K_3 , de forme du fond du lit, vaut 1,1 dans la plupart des cas (cf. tableau 3), à l'exception de lits caractérisés par la présence de dunes importantes (de hauteur supérieure ou égale à 1 m) ou de bancs d'alluvions à nu parfaitement connus et/ou redoutés pour être mobiles. Dans ces derniers cas, le facteur K_3 est pris égal à 1,3.

Tableau 3 : Détermination du facteur de correction K_3 d'après Arneson et al., 2012 [7]

Conditions d'évolution du fond du lit	Hauteur de dune (en m)	K_3
Aucune évolution : affouillement en eau claire	Sans objet	1,1
Lit plan et régime d'anti-dunes	Sans objet	1,1
Petites dunes	$0,6 \leq H < 3$	1,1
Dunes moyennes	$3 \leq H < 9$	1,1 à 1,2
Grandes dunes	$H \geq 9$	1,3

Nota : À défaut ou en complément d'éléments (*photos*) dans les *dossiers d'inspections (visites subaquatiques, relevés d'IDP, etc.)*, certains éléments de réponse peuvent être trouvés sur Internet, via GoogleEarth par exemple.

Le facteur de correction K_4 , correspondant à la taille des sédiments, est pris égal à :

- 1,0 si $D_{50} < 2$ mm (sables et limons) ;
- 0,4 si $D_{50} \geq 2$ mm ;
- 0,0 en présence de substratum ou matériau cimenté réputé non-affouillable affleurant.

À noter que la présence d'embâcles connus ou potentiels (flottants bloqués par les appuis en rivières) devrait théoriquement conduire à une aggravation du maître-couple « a » de la pile. La prolongation jusqu'au fond du lit de l'influence de la présence d'embâcles (généralement concentrés proche de la surface) est toutefois difficile à quantifier. Elle est ici considérée implicitement et indirectement couverte au travers de la cotation d'autres aspects favorisant l'occurrence de ce type de phénomène : réduction du débouché hydraulique au droit de l'ouvrage, dimension et forme des appuis, etc.

La profondeur totale d'affouillement P_{max} (en m) est finalement donnée par la somme des trois composantes P_1, P_2, P_3 calculées ci-avant : $P_{max} = P_1 + P_2 + P_3$.

À partir de la valeur d'affouillement maximale obtenue, trois niveaux d'aléas sont proposés dans le tableau 4. Les bornes associées aux différents niveaux ont été calibrées et validées à partir d'études menées dans différentes régions du territoire national, plus ou moins exposées au risque affouillement.

Tableau 4 : Évaluation de l'aléa « affouillement »

$P_{max} < 3$	Faible
$3 \leq P_{max} < 6$	Moyen
$P \geq 6$	Élevé

Notas :

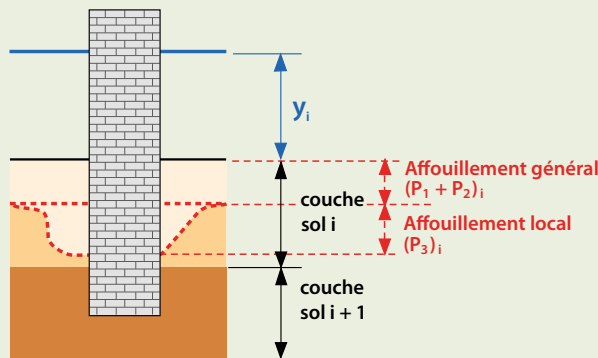
- Comme pour la vitesse maximale, la hauteur d'eau « y » employée ci-dessus dans l'évaluation des différentes profondeurs d'affouillement correspond à une référence de crue centennale. En l'absence de précision dans le dossier d'ouvrage ou d'information trouvée sur Internet, la cote « PHE » indiquée le cas échéant sur les plans peut être utilisée par défaut. Le niveau altimétrique maximal des enrochements en berges peut également donner une idée de cette cote. La cote du fond de lit correspond en outre à celle au niveau de l'appui considéré.

- Les niveaux d'affouillement ci-dessus sont évalués sur la base d'une hypothèse de caractéristiques de sol homogènes sur les 12 premiers mètres de profondeur du lit. En cas de variabilité notable des caractéristiques géotechniques des couches de sol constituant le fond de lit sur ces 12 premiers mètres, les résultats obtenus sont à plafonner à l'épaisseur de sol effectivement affouillable et/ou peuvent résulter d'une analyse dissociée de chacune des couches selon une **approche itérative**.

Dans le cadre de cette approche itérative, la hauteur d'eau « y » doit évoluer pour intégrer la profondeur d'affouillement général ($P_1 + P_2$) issue de l'itération précédente (mais pas l'affouillement local P_3 – cf. figure 8). **Trois cas de figure** peuvent alors se présenter :

- Cas 1 : L'affouillement total calculé ne dépasse pas l'épaisseur de la couche de sol i (figure 11) : $(P_1 + P_2 + P_3)_i \leq ep. \text{ couche } i$

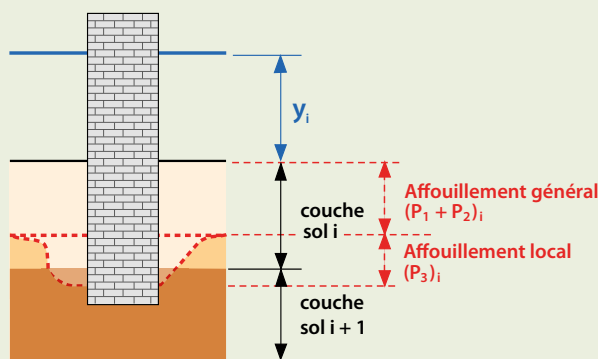
Figure 11 : Itérations sur l'évaluation de la profondeur d'affouillement – Cas 1 : $(P_1 + P_2 + P_3)_i \leq ep. \text{ couche } i$



=> fin des itérations

- Cas 2 : L'affouillement total calculé dépasse l'épaisseur de la couche de sol i, mais pas la part liée à l'affouillement général : $(P_1 + P_2 + P_3)_i > ep. \text{ couche } i$ et $(P_1 + P_2)_i \leq ep. \text{ couche } i$

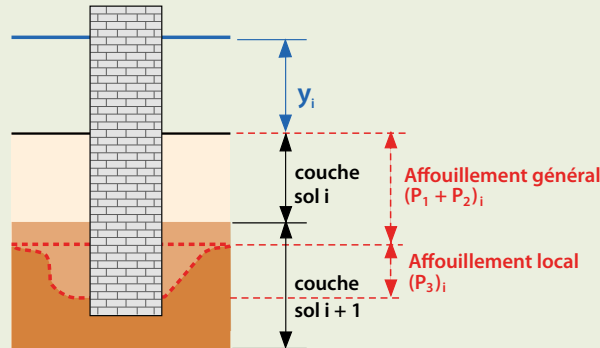
Figure 12 : Itérations sur l'évaluation de la profondeur d'affouillement – Cas 2 : $(P_1 + P_2 + P_3)_i > ep. \text{ couche } i$ et $(P_1 + P_2)_i \leq ep. \text{ couche } i$



=> nouvelle itération (i+1) avec : $y_{i+1} = y_i + (P_1 + P_2)_i$
 $P_{i+1} = \text{cote inf. couche } i + (P_3)_{i+1}$

- Cas 3 : L'affouillement général calculé dépasse l'épaisseur de la couche de sol i (figure 13) : $(P_1 + P_2)_i > \text{ep. couche } i$

Figure 13 : Itérations sur l'évaluation de la profondeur d'affouillement –
Cas 3 : $(P_1 + P_2)_i > \text{ep. couche } i$



=> nouvelle itération ($i+1$) avec : $y_{i+1} = y_i + \text{ep. couche } i$
 $P_{i+1} = \text{cote inf. couche } i + (P_1 + P_2 + P_3)_{i+1}$

- En cas d'existence d'un phénomène d'affouillement avéré au droit de l'ouvrage, ayant nécessité des travaux de protection des appuis postérieurs à la construction, ou des travaux de renforcement des fondations réalisés contre les affouillements au droit ou à proximité immédiate de l'ouvrage, le niveau d'aléa est considéré comme a minima « moyen » sauf analyse particulière.
- Par rapport au guide Cerema Analyse de risques des ponts en site affouillable [4], le nombre de classes d'aléa « affouillement » pour cette approche simplifiée semi-quantitative a été réduit de 5 à 3, par souci de cohérence avec les autres types d'aléas considérés dans le présent guide.

1.2.3 - ALÉA « POUSSÉE DES EAUX »

Plusieurs phénomènes sont à l'origine d'une poussée des eaux importante sur un ouvrage en cas de crue :

- la conception de l'ouvrage a pu sous-estimer les crues de projet ;
- des embâcles se sont accumulés contre l'ouvrage entraînant une poussée supplémentaire sur les piles de l'ouvrage due au courant ;
- dans le cas d'une montée des eaux importantes au-dessus de la veine inférieure de l'intrados de l'ouvrage, c'est même le tablier qui peut être soumis à une poussée due au courant ;
- enfin, une décrue rapide peut dans certains cas faire subir des surpressions, dues à l'eau, aux culées de l'ouvrage.

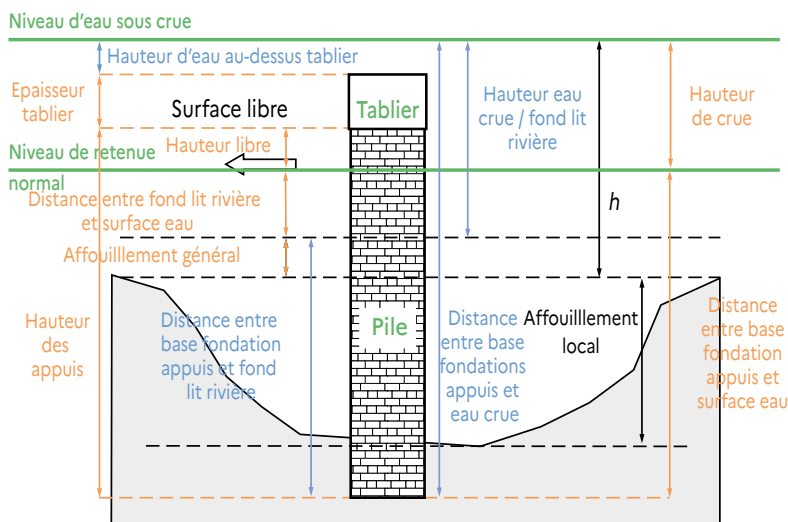
Les ouvrages de type « pont en maçonnerie » et « pont voûté en béton armé » (élargi ou non) sont traités indépendamment du reste des ouvrages du fait du profil variable de l'intrados et de l'encastrement sur appuis.

Ainsi, deux catégories d'ouvrage sont identifiées et seront traitées de manière indépendante dans la suite. Il s'agit des ouvrages dits « hors voûtes » et des ouvrages dits « voûtes ».

Le cas particulier des ouvrages de type « pont métallique en arc » est traité dans la catégorie « hors voûtes », mais bénéficie d'un traitement spécifique du fait de la partie en arc « ajourée » pour laquelle plus de détails seront également donnés dans la suite.

La figure 14 représente les principales données d'entrée nécessaires à l'évaluation de l'aléa « poussée des eaux ». Les données en orange correspondent aux données à connaître pour chaque ouvrage. Les données en bleu sont quant à elles directement déduites de ces dernières.

Figure 14 : Principales données d'entrée nécessaires à l'évaluation de l'aléa « poussée des eaux »



Nota : L'affouillement général est fourni par l'étape précédente concernant l'aléa « affouillement ».

1.2.3.1 - Ouvrages « hors voûtes »

Les critères évalués pour l'aléa « poussée des eaux » sont les suivants :

- poussée des eaux sur piles ;
- sensibilité des culées à la décrue ;
- poussée des eaux sur tablier.

Pour chaque critère, un système d'évaluation basé sur une classification en trois catégories de risque (faible, moyen, élevé) est proposé.

■ Poussée des eaux sur les piles – critère A :

La poussée des eaux sur les piles est la somme de la force hydrodynamique due au courant sur la pile et de la force due à l'accumulation potentielle de débris (embâcles).

Force hydrodynamique due au courant sur la pile :

Les efforts engendrés par une veine d'eau de vitesse moyenne v et de hauteur h sur un obstacle fixe de largeur B peuvent être assimilés à un diagramme de pressions triangulaire, dont la pression maximale p est située au niveau de la surface libre (cf. figure 15). La résultante F de ces efforts vaut :

$$F = k \rho_w h B v^2 \text{ (cf. Norme NF P94-262 [8])}$$

Avec, k : un facteur dépendant de la forme de l'obstacle (qui est ici la pile de l'ouvrage), $k = 0,72$ si la pile est carrée ou rectangulaire et $k = 0,35$ si la pile est circulaire ou cylindrique ;

ρ_w : la masse volumique de l'eau prise égale à $1\,000 \text{ kg/m}^3$;

h : la hauteur d'eau lors de la crue par rapport au fond du lit de la rivière (en m). Elle tient compte de l'affouillement général éventuel correspondant au niveau d'eau considéré, mais n'intègre pas la hauteur d'affouillement local ;

- B : la dimension des fûts de pile faisant obstacle à l'écoulement (en m) ;
- v : la vitesse moyenne de l'écoulement lors de la crue (en m/s) ;
- F : la force hydrodynamique due aux courants sur la pile (en N).

La formule précédente est valable pour l'évaluation de la poussée hydrodynamique du courant sur les piles seules, ou pour l'évaluation de cette poussée sur les piles et tout ou partie du tablier.

La dimension des fûts de pile faisant obstacle à l'écoulement dépend de l'angle d'attaque de l'écoulement θ . Si cet angle est nul, B correspond à l'épaisseur équivalente de pile (perpendiculaire au courant). Dès que cet angle est différent de 0, il faut tenir compte de la largeur de pile (largeur du voile ou somme des largeurs de fûts), de sorte que $B = \text{Largeur pile} * \sin \theta + \text{Epaisseur équivalente pile} * \cos \theta$.

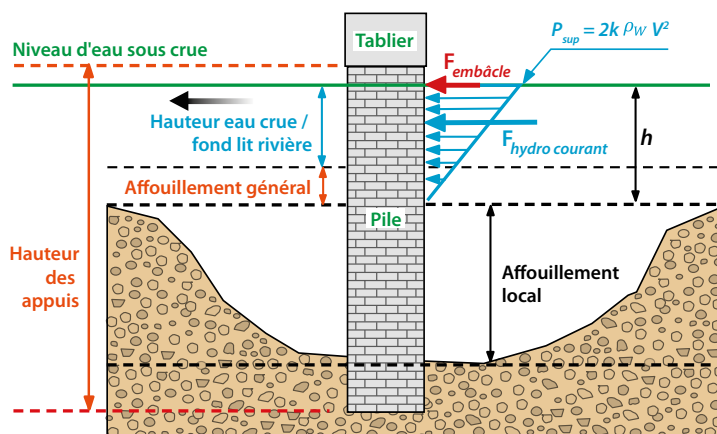
Pour le calcul final de F , on distingue alors deux cas :

- le cas où le niveau d'eau sous crue n'atteint pas le tablier : $F = \frac{1}{2} p h B$
- le cas où le tablier est ennoyé (partiellement ou totalement) : $F = \frac{1}{2} p (h - h') B \frac{(h - h')}{h}$; h' étant la distance entre le niveau d'eau sous crue et le haut de la pile.

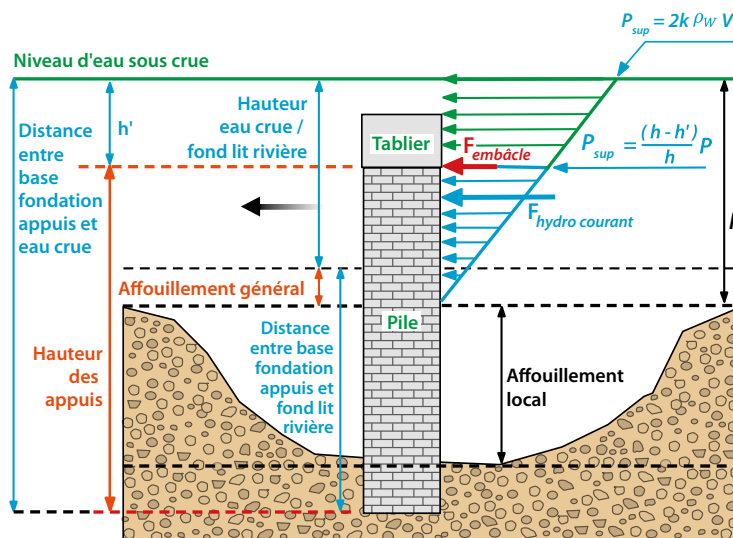
La figure 15 illustre ces deux cas.

Figure 15 : Poussée des eaux sur les piles :

a) Tablier non atteint par la crue



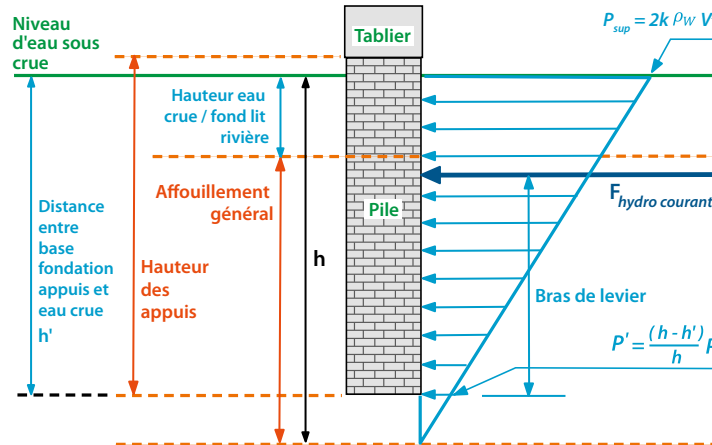
b) Tablier partiellement ou totalement ennoyé



À noter que pour certains ouvrages, la hauteur d'affouillement général peut descendre sous la base de la fondation de la pile. Dans ce cas, la criticité vis-à-vis de l'affouillement ressort en criticité élevée.

En ce qui concerne la criticité vis-à-vis de la poussée des eaux, seule la partie de pile soumise à la crue est prise en compte pour le calcul de la force hydrodynamique due au courant sur la pile (cf. figure 16).

Figure 16 : Poussée des eaux sur la pile pour un affouillement général descendant sous la base de la fondation



Force due à l'accumulation potentielle de débris (embâcles) :

L'accumulation potentielle de débris (embâcles) est représentée par la force F_{deb} calculée, pour un obstacle de forme rectangulaire, grâce à l'expression :

$$F_{deb} = k_{deb} A_{deb} v^2$$

Avec, k_{deb} : un paramètre de masse volumique des débris. La valeur recommandée est de 666 kg/m³ (cf. NF EN 1991-1-6 [9]) ;

v : la vitesse moyenne de l'écoulement lors de la crue, exprimée en m/s ;

A_{deb} : l'aire d'obstruction créée par les débris piégés et le cintre, exprimée en m².

On considère, dès qu'il existe une pile en rivière, qu'il y a un risque d'embâcle. Les dimensions indiquées dans le tableau 5 sont retenues afin de caractériser A_{deb} .

Tableau 5 : Dimensions considérées pour le calcul de A_{deb}

	Demi-somme des travées adjacentes à l'appui ≥ 20 m	Demi-somme des travées adjacentes à l'appui < 20 m
Dimensions considérées pour l'embâcle	Hauteur de 1 m	Hauteur de 1 m
	Longueur de 20 m	Demi-somme des travées adjacentes à l'appui

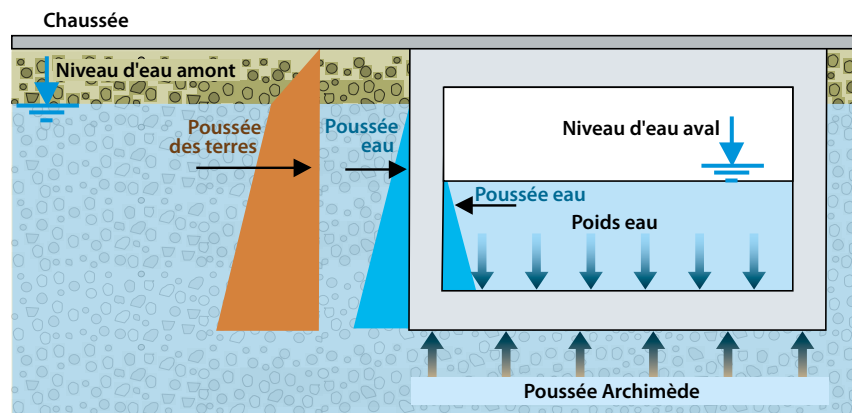
Après calcul de la force hydrodynamique due au courant sur la pile et de la force due à l'accumulation potentielle de débris (embâcles), l'évaluation de la « poussée des eaux sur les piles » peut être menée (note A, cf. tableau 6) :

Tableau 6 : Évaluation du critère aléa « poussée des eaux sur piles » – hors voûtes

$A (= F_{hydrodyn_pile}) < 150 \text{ kN}$	Faible
$150 \text{ kN} \leq A (= F_{hydrodyn_pile}) < 300 \text{ kN}$	Moyen
$A (= F_{hydrodyn_pile}) \geq 300 \text{ kN}$ $P \geq 6$	Élevé

■ Sensibilité des culées à la décrue – critère B :

Pour caractériser la sensibilité des culées à la décrue, on s'intéresse au rapport du niveau d'eau lors de la crue par rapport à la base de la fondation de l'appui, sur la hauteur des appuis (note B).

Figure 17 : Actions des terres dans le cas de la décrue au niveau d'un pont cadre (Source : Guide Eurocodes 0 et 1 - Application aux ponts routes et passerelles, Sétra, 2009)


Le système d'évaluation retenu est le suivant :

Tableau 7 : Évaluation du critère « sensibilité des culées à la décrue » – hors voûtes

$B (= h_{eau} / h_{appui}) < 1$	Faible
$1 \leq B (= h_{eau} / h_{appui}) < 2$	Moyen
$B (= h_{eau} / h_{appui}) \geq 2$	Élevé

■ Poussée des eaux sur le tablier – critère C :

De manière similaire à la poussée des eaux sur piles, la force hydrodynamique due au courant sur le tablier est calculée via l'expression :

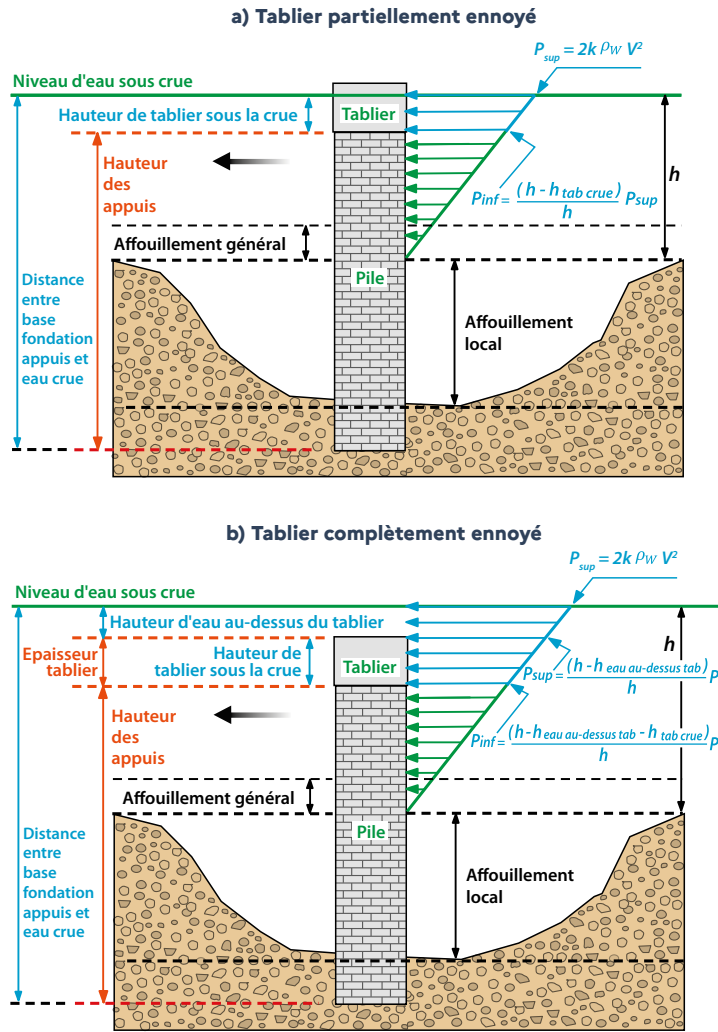
$$F = k \rho_W h_{tab\ crue} B v^2 = \frac{1}{2} \frac{p_{inf} + p_{sup}}{2} h_{tab\ crue} B$$

Avec, $h_{tab\ crue}$: la hauteur de tablier sous la crue (en m) ;

B : la longueur de tablier rapportée à un appui intermédiaire (en m) ;

p_{inf} et p_{sup} calculés selon la figure 18.

Figure 18 : Calcul des paramètres p_{inf} et p_{sup} :



Pour le cas particulier des ouvrages de type pont métallique en arc, la surface faisant obstacle à l'écoulement, sur la hauteur variable de tablier (hors hauteur constante de tablier), correspond au produit de la hauteur de tablier variable par la longueur de tablier rapportée à l'appui intermédiaire divisé par 4.

Le système d'évaluation suivant a été retenu :

Tableau 8 : Évaluation du critère « poussée des eaux sur tablier » – hors voûtes

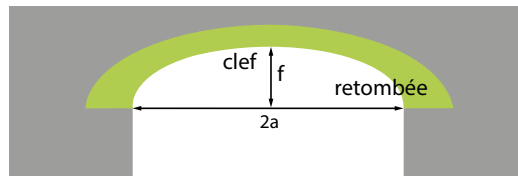
$C (= F_{hydrodyn_tablier}) < 80 \text{ kN}$	Faible
$80 \text{ kN} \leq C (= F_{hydrodyn_tablier}) < 150 \text{ kN}$	Moyen
$C (= F_{hydrodyn_tablier}) \geq 150 \text{ kN}$	Élevé

1.2.3.2 - Ouvrages « voûtes »

Les ouvrages « voûtes » concernent les ponts en maçonnerie ou en béton armé de forme arquée (profil variable de l'intrados et de l'encastrement sur appui).

Ces ouvrages sont caractérisés par leur ouverture, notée $2a$, et leur flèche, f (cf. figure 19).

Figure 19 : Caractérisation d'une voûte



Le surbaissement correspond au paramètre : $\sigma = \frac{f}{2a}$. Il permet de définir trois types de voûte :

- **voûte plein cintre**, pour $\sigma = 1/2$;
- **voûte surbaissée**, pour $1/5 \leq \sigma < 1/2$;
- **voûte très surbaissée**, pour $\sigma < 1/5$.

Si la flèche est inconnue, il est possible de la calculer à partir de l'ouverture en considérant :

- $\sigma = 1/2$ pour une voûte plein cintre ;
- $\sigma = 1/4$ pour une voûte surbaissée ;
- $\sigma = 1/7$ pour une voûte très surbaissée.

Pour les ouvrages « voûtes », les critères évalués pour l'aléa « poussée des eaux » sont au nombre de deux :

- Poussée des eaux sur piles ;
- Sensibilité des culées à la décrue.

De manière similaire au cas des ouvrages « hors voûtes », un système d'évaluation basé sur une classification en trois catégories (faible, moyen, élevé) est proposé pour chaque critère.

■ Poussée des eaux sur les piles et la voûte – critère A :

La poussée des eaux sur les piles et la voûte est la somme de la force hydrodynamique due au courant sur la pile et la force due à l'accumulation potentielle de débris (embâcles).

Force hydrodynamique due au courant sur la pile et la voûte :

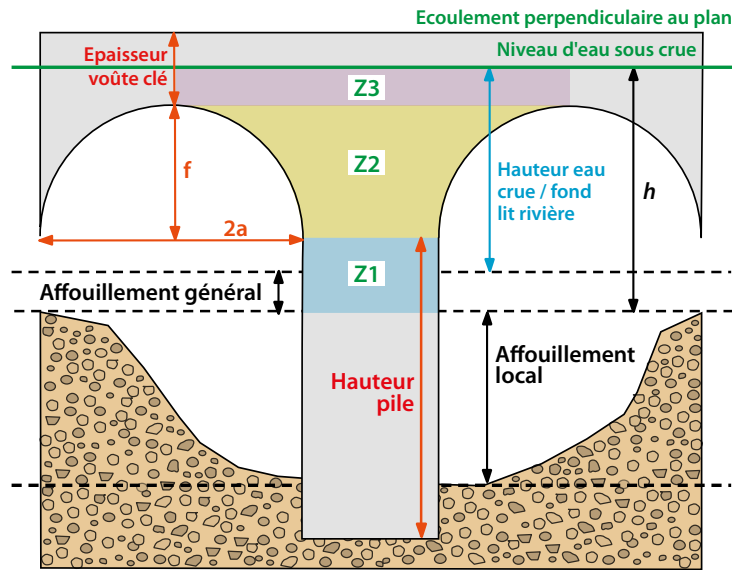
Le calcul de la force hydrodynamique due au courant sur la pile et la voûte est similaire au calcul mené précédemment, avec $F = k \rho_w S v^2$.

Les paramètres k , ρ_w et v restent identiques. Il faut toutefois noter que lorsque la crue atteint le surbaissement ou la voûte, la valeur de 0,72 est considérée pour k .

S correspond ici à la surface faisant obstacle à l'écoulement (en m^2). Cette surface dépend du niveau d'eau sous la crue (niveau d'eau au niveau de la pile, du surbaissement, de la voûte ou au-dessus de la voûte), de l'angle d'attaque de l'écoulement et du type de voûte (plein cintre, surbaissée, très surbaissée).

À titre d'exemple, la figure 20 illustre le découpage en trois zones utilisé pour le calcul de la surface faisant obstacle à l'écoulement, pour un ouvrage voûte plein cintre et pour une crue au niveau de la voûte.

Figure 20 : Exemple de calcul de la surface faisant obstacle à l'écoulement, pour un ouvrage voûte plein cintre et une crue au niveau de la voûte



Pour la zone 1, de manière identique au cas des ouvrages « hors voûtes », la dimension des fûts de pile faisant obstacle à l'écoulement dépend de l'angle d'attaque de l'écoulement, θ :

$$B = \text{Largeur pile} * \sin \theta + \text{Epaisseur équivalente pile} * \cos \theta$$

Pour la zone 2, l'expression précédente est conservée mais on considère une épaisseur moyenne de pile :

$$B = \text{Largeur pile} * \sin \theta + \text{Epaisseur équivalente moyenne pile} * \cos \theta$$

Enfin, pour la zone 3, B est prise égale à la longueur de tablier rapportée à la pile.

Force due à l'accumulation potentielle de débris (embâcles) :

La force due à l'accumulation potentielle de débris est calculée de manière identique au cas des ouvrages « hors voûtes » (cf. §1.2.3.1 pour plus de détails).

Après calcul de la force hydrodynamique due au courant sur la pile et la voûte et de la force due à l'accumulation potentielle de débris (embâcles), l'évaluation de la « poussée des eaux sur la pile et la voûte » est menée (note A) :

Tableau 9 : Évaluation du critère « poussée des eaux sur la pile et la voûte » – ouvrages voûtes

$A (= F_{hydrodyn_pile+voûte}) < 600 \text{ kN}$	Faible
$600 \text{ kN} \leq A (= F_{hydrodyn_pile+voûte}) < 1200 \text{ kN}$	Moyen
$A (= F_{hydrodyn_pile+voûte}) \geq 1200 \text{ kN}$	Élevé

■ **Sensibilité des culées à la décrue – critère B :**

La sensibilité des culées à la décrue est évaluée de manière identique au cas des ouvrages « hors voûtes ». Le système d'évaluation du critère est rappelé ici :

Tableau 10 : Évaluation du critère « sensibilité des culées à la décrue » – ouvrages voûtes

$B (= h_{eau} / h_{appui}) < 1$	Faible
$1 \leq B (= h_{eau} / h_{appui}) < 2$	Moyen
$B (= h_{eau} / h_{appui}) \geq 2$	Élevé

1.2.4 - ALÉA « CHOC DE BATEAU »

Les chocs de navire sur les ponts sont à l'origine de nombreux sinistres. On distingue le choc sur une pile et le choc sur le tablier, qui ont des probabilités d'occurrence différentes et pour lesquels la vulnérabilité de la structure est différente. Par ailleurs, il convient également de distinguer les situations de crue permettant la navigation de celles l'interdisant.

Lorsque la navigation est autorisée, on considère que la hausse du niveau d'eau rend une collision plus probable du fait de la baisse du tirant d'air sous les ouvrages et de la hausse de la vitesse du courant. Dans le cas d'une situation de crue interdisant la navigation, le choc peut être produit par un navire en perdition, dérivant par exemple à la suite d'une rupture d'amarres : la hausse du niveau de l'eau peut rendre le dispositif d'amarrage inopérant, notamment si le quai ou la berge n'offrent plus d'appui latéral ou si l'amarrage a été mal réalisé, notamment en situation d'urgence.

Ainsi, pour l'aléa « choc de bateau », cinq situations sont examinées :

- choc sur pile, navigation autorisée ;
- choc sur pile, navigation non autorisée (rupture d'amarres) ;
- choc sur tablier, navigation autorisée ;
- choc sur tablier, navigation non autorisée (rupture d'amarres) ;
- cas d'une passe bloquée, navigation non autorisée (rupture d'amarres).

1.2.4.1 - Choc sur pile, navigation autorisée

Trois critères d'aléa sont évalués :

- la possibilité physique d'un choc ;
- l'intensité probable du choc ;
- la probabilité d'occurrence du choc.

Pour chaque critère, un système de notation est proposé permettant ensuite une classification en trois catégories (faible, moyen, élevé) du niveau de l'aléa étudié.

■ Possibilité physique d'un choc :

La possibilité physique d'un choc va dépendre de la présence ou non de navires mais également de la présence ou non de pile en rivière. Le système d'évaluation suivant est proposé :

Tableau 11 : Évaluation du critère « possibilité physique d'un choc » – choc sur pile, navigation autorisée

Situation de l'ouvrage		Notation
Aucun choc sur pile à redouter	L'ouvrage ne comprend pas de pile	$A_1 = 0$
	Les piles de l'ouvrage sont protégées	$A_2 = 0$
	Le chenal est fermé à la navigation	$A_3 = 0$
Choc sur pile possible	Tous les autres cas	1

■ Intensité du choc :

Les chocs les plus à redouter sont ceux dont l'intensité est la plus élevée, intensité qui dépend majoritairement de la masse et de la vitesse des navires.

La prise en compte de la masse des navires est réalisée via la classe de trafic autorisée sous l'ouvrage. L'Eurocode donne, suivant la classe de trafic, une intensité pour le choc frontal à prendre en compte pour le dimensionnement des piles.

Concernant la vitesse des navires, la vitesse maximale autorisée par VNF sous l'ouvrage est considérée.

Ces considérations aboutissent au système d'évaluation suivant :

Tableau 12 : Évaluation du critère « intensité du choc » – choc sur pile, navigation autorisée

Masse des navires		Notation
Classe du trafic (selon circulaire 95-86) (trafic éventuellement dégradé par la crue)	Voie non dédiée au transport de marchandise	$A_{4, \text{non nav ou non com}} = 0$
	Classe 0 ou Classe I	$A_{4, \text{classes 0/I}} = 1$
	Classe II	$A_{4, \text{classes II}} = 2$
	Classes III ou Classe IV	$A_{4, \text{classes III/IV}} = 3$
	Classes V	$A_{4, \text{classes V}} = 5$
	Classes VI	$A_{4, \text{classes VI}} = 7$
	Classe VII	$A_{4, \text{classe VII}} = 9$
Vitesse des navires		Notation
Vitesse du trafic fluvial	Limitée à 12 km/h	$A_{5, 12 \text{ km/h}} = 1$
	Limitée à 20 km/h	$A_{5, 20 \text{ km/h}} = 3$

■ Probabilité d'occurrence du choc :

La probabilité d'occurrence d'un choc est liée à la densité du trafic et à l'ouverture de la passe navigable. Le risque de collision entre un bateau et un élément de pont est également en partie tributaire de la typologie de la flotte marchande. Il apparaît donc nécessaire de disposer d'informations quant à la constitution de la flotte, sa répartition et la gamme des bateaux qui naviguent sur les cours d'eau navigables.

La densité de trafic est ainsi à analyser selon le type de trafic (trafic de marchandises, navires commerciaux de transport de passagers ou navires de tourisme). Des données relatives au trafic peuvent notamment être apportées grâce au dénombrement des bateaux aux écluses. Le croisement des données de trafic en tonnes manutentionnées et le dénombrement des bateaux suggèrent un poids moyen des unités circulant sur chaque branche de réseau. L'analyse vis-à-vis de l'aléa choc tient compte de l'intensité du trafic fluvial de marchandises et de tourisme, qui doit être caractérisé comme important ou faible.

Concernant l'ouverture de passe navigable, celle-ci est définie en fonction de la classe de navigation autorisée sous l'ouvrage par la circulaire 94-86. Pour chaque classe de navigation, sont connues la largeur maximale des navires, l'ouverture libre minimale et l'ouverture libre normale. Ainsi, en fonction de la classe de navigation et de l'ouverture considérée, le système d'évaluation suivant a pu être proposé :

Tableau 13 : Évaluation du critère « probabilité d'occurrence du choc » – choc sur pile, navigation autorisée

Densité de trafic		Notation
Trafic de marchandises	Important	$A_6 = 3$
	Faible	$A_6 = 1$
Trafic hors marchandises	Important	$A_7 = 3$
	Faible	$A_7 = 1$
Ouverture de la passe navigable		Notation
Classes 0 ou Classe I ou Classe II ou Voie non dédiée au transport de marchandises	$0 < \text{ouverture} < 30$	$A_8 = 4$
	$30 < \text{ouverture} < 39$	$A_8 = 3$
	$39 < \text{ouverture} < 50$	$A_8 = 2$
	$50 < \text{ouverture}$	$A_8 = 1$
Classes III ou Classe IV	$0 < \text{ouverture} < 36$	$A_8 = 5$
	$36 < \text{ouverture} < 45$	$A_8 = 4$
	$45 < \text{ouverture} < 105$	$A_8 = 2$
	$105 < \text{ouverture}$	$A_8 = 1$
Classes V ou Classe VI	$0 < \text{ouverture} < 36$	$A_8 = 6$
	$36 < \text{ouverture} < 45$	$A_8 = 5$
	$45 < \text{ouverture} < 90$	$A_8 = 3$
	$90 < \text{ouverture} < 180$	$A_8 = 1$
	$180 < \text{ouverture}$	$A_8 = 1$
Classe VII	$0 < \text{ouverture} < 38$	$A_8 = 7$
	$38 < \text{ouverture} < 47$	$A_8 = 6$
	$47 < \text{ouverture} < 94$	$A_8 = 3$
	$94 < \text{ouverture} < 180$	$A_8 = 1$
	$180 < \text{ouverture}$	$A_8 = 1$

Note finale « choc sur pile, navigation autorisée » :

L'aléa « choc sur pile, navigation autorisée » est évalué sur la base du produit $A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5 \cdot A_6 \cdot A_7 \cdot A_8$, dont la valeur varie entre 0 (aucun choc possible) et 1701 (aléa maximal). Ce choix se justifie par l'impact essentiellement proportionnel des différents paramètres de l'aléa.

Afin d'effectuer une catégorisation adaptée des ouvrages, la note finale est obtenue en appliquant la relation suivante :

$$A = 0,485 \cdot \sqrt{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5 \cdot A_6 \cdot A_7 \cdot A_8}$$

où le coefficient 0,485 est calibré pour ramener la note dans un intervalle allant de 0 à 20 ($0,485 \sqrt{1701} = 20$)

Plusieurs situations représentatives ont ensuite été considérées afin de fixer les intervalles de niveau élevé, moyen et faible (cf. tableau 14).

Tableau 14 : Définition des bornes pour l'évaluation de l'aléa « choc de bateau sur pile, navigation autorisée »

	Classe de navigation	Vitesse des navires	Trafic de marchandises	Trafic hors marchandises	Ouverture de la passe navigable	Note finale A obtenue
Situation 1	Classe IV	12 km/h	faible	faible	0 < ouverture < 36	1,88
Situation 2	Classe IV	20 km/h	important	important	0 < ouverture < 36	9,75
Situation 3	Classe VI	12 km/h	important	important	0 < ouverture < 36	9,43
Situation 4	Classe VI	20 km/h	important	important	0 < ouverture < 36	16,34
Situation 5	Classe VII	12 km/h	important	important	0 < ouverture < 38	11,53
Situation 6	Classe VII	20 km/h	important	faible	180 < ouverture	4,36
Situation 7	Classe VII	20 km/h	important	faible	47 < ouverture < 94	7,57
Situation 8	Classe VII	20 km/h	important	faible	38 < ouverture < 47	10,68

Nota : Les vitesses retenues sont celles des Règlements particuliers de police publiés par Voies navigables de France (VNF) [12].

Les situations 1 et 6 correspondent à des situations où l'aléa semble faible. Les situations 2, 3 et 7 seraient plutôt à classer en aléa moyen, tandis que les situations 4, 5 et 8 correspondent à des situations où l'aléa semble élevé.

À partir de ces analyses, les intervalles suivants pour l'évaluation du niveau d'aléa sont proposés :

Tableau 15 : Évaluation de l'aléa « choc de bateau – choc sur pile, navigation autorisée »

$0 \leq A \leq 5$	Faible
$5 < A \leq 10$	Moyen
$10 < A \leq 20$	Élevé

1.2.4.2 - Choc sur pile lié à une rupture d'amarre

On retient les mêmes notions qu'au paragraphe précédent. L'aléa est maintenant évalué par la lettre B.

■ Possibilité physique d'un choc :

On retient le même raisonnement que précédemment.

Tableau 16 : Évaluation du critère « possibilité physique d'un choc » – choc sur pile lié à une rupture d'amarre

Situation de l'ouvrage		Notation
Aucun choc sur pile à redouter	L'ouvrage ne comprend pas de pile	$B_1 = 0$
	Les piles de l'ouvrage sont protégées	$B_2 = 0$
	Le chenal est fermé à la navigation	$B_3 = 0$
Choc sur pile possible	Tous les autres cas	1

■ Intensité du choc :

Seuls les navires amarrés à l'amont des ouvrages sont à prendre en considération. Ceux-ci étant en perdition, moteur éteint suite à la rupture d'amarre, leur vitesse est alors celle du courant de la rivière.

Pour les classes de trafic correspondant à des navires de marchandises, les notes B_4 proposées sont évaluées de manière identique aux notes A_4 de la partie précédente.

Pour les navires ne transportant pas de marchandises, on peut assimiler la valeur d'effort du choc frontal à celle donnée pour les navires de classe de marchandise correspondant à une péniche « Freycinet ». Ceci est une évaluation par excès, car les « bateaux-logements » sont en réalité peu lourds. À titre indicatif, leur nombre est d'environ 1 300 sur le bassin de la Seine.

Les bateaux-logements les plus courants correspondent en effet à des bateaux de classe I au sens de la circulaire 76-38, modifiée par la circulaire 95-86, et au sens de la classification de la CEMT (Conférence Européenne des Ministres des Transports). Il est à noter que ces bateaux peuvent être considérés comme « vides » en comparaison des bateaux de marchandises, dont la masse est en grande partie liée à leur chargement.

On obtient ainsi *in fine* :

Tableau 17 : Évaluation du critère « intensité du choc » – choc sur pile lié à une rupture d'amarre

Masse des navires		Notation
Navires autres que marchandises, classe 0 et classe I		$B_{4, \text{autre que marchandises classe 0 \& I}} = 1$
Classe du trafic (selon circulaire 95-86) (trafic éventuellement dégradé par la crue)	Classe II	$B_{4, \text{classes II}} = 2$
	Classes III et IV	$B_{4, \text{classes III\&IV}} = 3$
	Classes V et VI	$B_{4, \text{classes V\&VI}} = 5$
	Classe VII	$B_{4, \text{classe VII}} = 7$
Vitesse des navires		Notation
Vitesse du bateau en perdition (égale à la vitesse moyenne de l'eau de la rivière)	De 0 à 2,5 km/h	$B_{5, 0-2,5\text{km/h}} = 1$
	De 2,5 à 5 km/h	$B_{5, 2,5-5\text{km/h}} = 4$
	De 5 à 7,5 km/h	$B_{5, 5-7,5\text{km/h}} = 9$
	De 7,5 à 10 km/h	$B_{5, 7,5-10\text{km/h}} = 16$
	> 10 km/h	$B_{5, >10\text{km/h}} = 20$

■ Probabilité d'occurrence du choc :

La probabilité d'occurrence d'un choc est évaluée en fonction de l'ouverture de la passe navigable (plus la passe est étroite, plus la probabilité de choc augmente) et du nombre de bateau à l'amarrage en amont de l'ouvrage. Ces points sont évalués par l'intermédiaire des notes B_6 et B_7 .

Ouverture de la passe navigable (note B_6) :

Les navires sont toujours considérés en perdition et peuvent donc se mettre en travers du cours d'eau, c'est donc la longueur du navire en perdition qui importe. Cette longueur est à nouveau définie par la classe de navigation. Le biais du cours d'eau par rapport aux piles de l'ouvrage est également à prendre en compte. Dans le cas d'un biais du cours d'eau, la probabilité que les navires en perdition se présentent de travers est alors plus élevée, cf. figure 27.

Figure 21 : Représentation de l'orientation possible du cours d'eau par rapport aux piles de l'ouvrage (Source : Cerema)

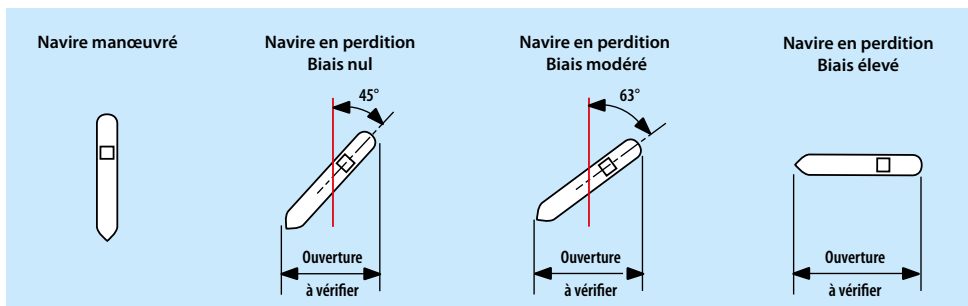


Afin d'évaluer l'occurrence du choc, nous proposons de comparer l'ouverture du pont à l'ouverture limite obtenue en considérant que le navire se présente biais par rapport à l'ouvrage.

- pour un ouvrage où le cours d'eau est parallèle aux piles : on considère, de manière arbitraire, que le navire se présente à 45° par rapport à l'axe du cours d'eau ;
- pour un ouvrage où le cours d'eau présente un biais de 100 à 80 grades : on considère que le navire se présente à 63° par rapport à l'axe du cours d'eau (soit 45° + 20 grades) ;
- pour un ouvrage où le cours d'eau présente un biais supérieur à 80 grades : on considère que le navire se présente sous l'ouvrage dans le sens de sa longueur.

La figure 22 représente de manière schématique les différentes ouvertures à vérifier en fonction du biais considéré.

Figure 22 : Représentation schématique des différentes ouvertures à vérifier en fonction du biais considéré



La longueur du navire considérée est la longueur maximale de la classe de navigation la plus élevée rencontrée à l'amarre, à l'amont de l'ouvrage. Pour des navires autres que ceux de marchandises, on considère une longueur de 38,5 m qui correspond à la longueur maximale des navires de classe I au sens de la circulaire 94-86.

Le système de notation retenu pour B_6 est le suivant :

Tableau 18 : Évaluation du critère « probabilité d'occurrence du choc » – choc sur pile lié à une rupture d'amarrage – note B_6

Trafic	Biais	Ouverture de la passe	Notation
Navire autre que marchandises et Classe 0	100 grad	ouverture < 27	$B_6 = 10$
		27 < ouverture < 54	$B_6 = 5$
		54 < ouverture	$B_6 = 1$
	100 grad < biais < 80 grad	ouverture < 34	$B_6 = 10$
		34 < ouverture < 69	$B_6 = 5$
		69 < ouverture	$B_6 = 1$
	biais < 80 grad	ouverture < 38,5	$B_6 = 10$
		38,5 < ouverture < 77	$B_6 = 5$
		77 < ouverture	$B_6 = 1$
Classes I et II <i>(longueur max. du navire = 50 m)</i>	100 grad	ouverture < 35	$B_6 = 10$
		35 < ouverture < 71	$B_6 = 5$
		71 < ouverture	$B_6 = 1$
	100 grad < biais < 80 grad	ouverture < 45	$B_6 = 10$
		45 < ouverture < 90	$B_6 = 5$
		90 < ouverture	$B_6 = 1$
	biais < 80 grad	ouverture < 50	$B_6 = 10$
		50 < ouverture < 100	$B_6 = 5$
		100 < ouverture	$B_6 = 1$
Classes III et IV <i>(longueur max du navire = 105 m)</i>	100 grad	ouverture < 74	$B_6 = 10$
		74 < ouverture < 148	$B_6 = 5$
		148 < ouverture	$B_6 = 1$
	100 grad < biais < 80 grad	ouverture < 93	$B_6 = 10$
		93 < ouverture < 186	$B_6 = 5$
		186 < ouverture	$B_6 = 1$
	biais < 80 grad	ouverture < 105	$B_6 = 10$
		105 < ouverture < 210	$B_6 = 5$
		210 < ouverture	$B_6 = 1$
Classes V et VI <i>(longueur max du navire = 180 m)</i>	100 grad	ouverture < 127	$B_6 = 10$
		127 < ouverture < 255	$B_6 = 5$
		255 < ouverture	$B_6 = 1$
	100 grad < biais < 80 grad	ouverture < 160	$B_6 = 10$
		160 < ouverture < 320	$B_6 = 5$
		320 < ouverture	$B_6 = 1$
	biais < 80 grad	ouverture < 180	$B_6 = 10$
		180 < ouverture < 360	$B_6 = 5$
		360 < ouverture	$B_6 = 1$
Classe VII <i>(longueur > 180 m)</i>	100 grad	ouverture < 127	$B_6 = 10$
		127 < ouverture < 255	$B_6 = 5$
		255 < ouverture	$B_6 = 1$
	100 grad < biais < 80 grad	ouverture < 160	$B_6 = 10$
		160 < ouverture < 320	$B_6 = 5$
		320 < ouverture	$B_6 = 1$
	biais < 80 grad	ouverture < 180	$B_6 = 10$
		180 < ouverture < 360	$B_6 = 5$
		360 < ouverture	$B_6 = 1$

Nombre de bateaux à l'amarrage (note B₇) :

La densité de navires amarrés est corrélée à l'intensité du trafic portuaire. Ainsi, dans les zones portuaires, le trafic de déchargement est fort, tandis qu'en dehors, ce trafic est faible et très localisé (quais de part et d'autre des écluses, quai de déchargement de sablière). Le trafic portuaire d'une zone est évalué ici à l'aide du trafic de marchandises.

La densité de navires amarrés est également corrélée à la présence ou non de zones urbanisées. En effet, les berges urbaines sont fréquemment utilisées comme lieu d'amarrage de bateaux à vocation d'habitation ou commerciale. En cas de crue, les bateaux-logements présentent un risque de constituer des objets flottants en perdition, par exemple suite à une rupture d'amarre. Ils peuvent alors être à l'origine de chocs sur les ponts (piles ou tablier). L'analyse en tient compte, en estimant que ces bateaux sont présents lorsque les berges sont urbanisées.

La note B₇ est alors obtenue en considérant le maximum des sous-indices B₇₁ et B₇₂ : **B₇ = Max (B₇₁ ; B₇₂)**, cf. tableau 19.

Tableau 19 : Évaluation du critère « probabilité d'occurrence du choc » – choc sur pile lié à une rupture d'amarre – note B₇

Trafic		Notation
Densité du trafic de marchandises	Important	B ₇₁ = 1
	Faible	B ₇₁ = 0,3
Type de berges		Notation
Berges urbanisées		B ₇₂ = 1
Berges de campagne		B ₇₂ = 0,3

Note finale « choc sur pile, lié à une rupture d'amarre (navigation non autorisée) » :

L'aléa « choc sur pile lié à une rupture d'amarre », notée B est évalué sur la base du produit B₁·B₂·B₃·B₄·B₅·B₆, dont la valeur varie entre 0 (aucun choc possible) et 1 400 (aléa maximal). Comme précédemment, la note finale est obtenue en appliquant la formule suivante :

$$B = 0,535 \cdot \sqrt{B_1 \cdot B_2 \cdot B_3 \cdot B_4 \cdot B_5 \cdot B_6}$$

où le coefficient 0,535 est calibré pour ramener la note dans un intervalle allant de 0 à 20 ($0,535 \sqrt{1400} = 20$).

De la même façon, plusieurs situations ont été considérées afin de fixer les intervalles de niveau élevé, moyen et faible, (cf. tableau 20).

**Tableau 20 : Définition des bornes pour l'évaluation de l'aléa
« choc de bateau sur pile lié à une rupture d'amarre »**

	Classe de navigation	Vitesse du courant	Biais	Ouverture de la passe navigable	Note finale B obtenue
Situation 1	Classe VII	2,9 m/s	100 grad	50 m	20
Situation 2	Classe VI	2,9 m/s	100 grad	180 m	11,14
Situation 3	Classe VII	0,6 m/s	100 grad	50 m	4,48
Situation 4	Classe VI	0,6 m/s	100 grad	180 m	3,16
Situation 5	Classe IV	0,6 m/s	100 grad	50 m	2,93
Situation 6	Classe IV	0,6 m/s	100 grad	100 m	2,07
Situation 7	Classe IV	2,9 m/s	100 grad	50 m	13,10
Situation 8	Classe IV	2,9 m/s	100 grad	100 m	9,26
Situation 9	Autre que marchandise	0,6 m/s	100 grad	35 m	2,93
Situation 10	Autre que marchandise	2,9 m/s	100 grad	35 m	5,35
Situation 11	Autre que marchandise	12,9 m/s	100 grad	25 m	7,57

Les situations 4, 6 et 9 correspondent à des situations où l'aléa semble faible. Les situations 3, 5, 8, 10 et 11 seraient plutôt à classer en aléa moyen, tandis que les situations 1, 2 et 7 correspondent à des situations où l'aléa semble élevé.

À partir de ces analyses, les intervalles suivants pour l'évaluation du niveau d'aléa sont proposés :

Tableau 21 : Évaluation de l'aléa « Choc de bateau – choc sur pile lié à une rupture d'amarre »

$0 \leq B \leq 4$	Faible
$4 < B \leq 10$	Moyen
$10 < B \leq 20$	Élevé

1.2.4.3 - Choc sur tablier, navigation autorisée

On retient les mêmes notions qu'au paragraphe précédent. L'aléa est maintenant évalué par la lettre C.

■ Possibilité physique d'un choc :

Deux cas se présentent, le cas d'un trafic fluvial autorisé ou non, et deux notes en découlent :

Tableau 22 : Évaluation du critère « possibilité physique d'un choc » – choc sur tablier, navigation autorisée

Situation de l'ouvrage	Notation
Navigation interdite	$C_1 = 0$
Navigation autorisée	1

■ Intensité du choc :

Le tablier est en général peu apte à reprendre un choc de navire, cet aléa ayant été très rarement pris en considération dans la conception des ouvrages. Nous ne tenons compte ici, par simplification, que de la masse des navires. La réalité obligerait à distinguer les superstructures du navire, les types de chargement, mais aussi le niveau d'enfoncement des navires. La masse est donnée par la classe de trafic des navires autorisés à circuler sous la crue.

Le système de notation proposé est le suivant :

Tableau 23 : Évaluation du critère « intensité du choc » – choc sur tablier, navigation autorisée

Masse des navires		Notation
Classe du trafic (selon circulaire 95-86) <i>(trafic éventuellement dégradé par la crue)</i>	Navire autre que marchandise, classe 0 ou Classe I	$C_{2, \text{classes I}} = 1$
	Classe II	$C_{2, \text{classes II}} = 2$
	Classes III et IV	$C_{2, \text{classes III\&IV}} = 3$
	Classes V	$C_{2, \text{classes V}} = 4$
	Classes VI	$C_{2, \text{classes VI}} = 5$
	Classe VII	$C_{2, \text{classe VII}} = 7$

■ Probabilité d'occurrence du choc :

La probabilité d'occurrence d'un choc va dépendre de la densité de trafic et de la hauteur résiduelle de la passe de navigation sous la crue.

Concernant la hauteur libre de l'ouvrage, les textes réglementaires (circulaire 95-86) donnent des valeurs de gabarits minimaux à respecter suivant la classe de trafic. Pour les navires autres que ceux de marchandises, on considère la valeur donnée pour la classe I de navigation. Ces valeurs sont des valeurs minimales à considérer pour les projets neufs. Si la hauteur libre résiduelle est inférieure à cette valeur limite pour les ouvrages neufs, on considère que la possibilité d'occurrence est élevée ($C_5 = 10$). Si la hauteur libre est supérieure à la valeur limite plus 1 m, on considère que la probabilité d'occurrence de l'aléa est nulle ($C_5 = 0$). Entre ces deux limites, on peut avoir un choc léger lié à un dépassement des équipements sur le navire, on considère donc que le risque de choc n'est pas nul, mais que ce choc ne correspond pas à un choc de la pleine masse du navire ($C_5 = 1$).

Le système de notation retenu sur la base de ces considérations est le suivant :

Tableau 24 : Évaluation du critère « probabilité d'occurrence du choc » – choc sur tablier, navigation autorisée

Densité de trafic		Notation
Trafic de marchandises	Important	$C_3 = 3$
	Faible	$C_3 = 1$
Trafic hors marchandises	Important	$C_4 = 3$
	Faible	$C_4 = 1$
Hauteur libre résiduelle de l'ouvrage (en m)		Notation
Navires autres que marchandises, classe 0 ou classe I	$H_r < 3,7$	$C_5 = 10$
	$3,7 \leq H_r < 4,7$	$C_5 = 1$
	$4,7 \leq H_r$	$C_5 = 0$
Classe II ou III	$H_r < 4,1$	$C_5 = 10$
	$4,1 \leq H_r < 5,1$	$C_5 = 1$
	$5,1 \leq H_r$	$C_5 = 0$
Classe IV	$H_r < 5,25$	$C_5 = 10$
	$5,25 \leq H_r < 6,25$	$C_5 = 1$
	$6,25 \leq H_r$	$C_5 = 0$
Classes V et VI	$H_r < 7$	$C_5 = 10$
	$7 \leq H_r < 8$	$C_5 = 1$
	$8 \leq H_r$	$C_5 = 0$
Classe VII	$H_r < 7$	$C_5 = 10$
	$7 \leq H_r < 8$	$C_5 = 1$
	$8 \leq H_r$	$C_5 = 0$

Nota : La hauteur libre résiduelle prise en compte dans l'analyse correspond à la hauteur libre sous niveau d'eau normal (niveau « RN ») moins la hauteur d'eau correspondant à la hauteur de crue.

Pour les ouvrages voûtés, principalement des ouvrages en maçonnerie, dont la ligne d'intrados a un profil variable, les gabarits des passes sont généralement donnés dans la zone centrale de la voûte. Pour tenir compte de la forme variable de celle-ci, pour une voûte d'ouverture $2.L$, on considère que la hauteur libre est celle obtenue à une distance $1/3.L$ des appuis.

On fait l'hypothèse que la voûte a une forme parabolique ($g(x) = Ax^2 + Bx + C$), avec une flèche f . La hauteur libre à $1/3.L$ des appuis vaut $H - 4/9.f$, où H est la hauteur libre sous la clé de la voûte.

Note finale « choc sur tablier, navigation autorisée » :

L'aléa « choc sur tablier, navigation autorisée », noté C , est évalué à partir du produit $C_1.C_2.C_3.C_4.C_5$, dont la valeur varie entre 0 (aucun choc possible) et 630 (aléa maximal).

Comme précédemment, la note finale est obtenue en appliquant la formule suivante :

$$C = 0,796 \cdot \sqrt{C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5}$$

où le coefficient 0,796 est calibré pour ramener la note dans un intervalle allant de 0 à 20 ($0,796 \sqrt{630} = 20$).

Plusieurs situations représentatives ont été considérées afin de fixer les intervalles de niveau élevé, moyen et faible (cf. tableau 25).

Tableau 25 : Définition des bornes pour l'évaluation de l'aléa « choc de bateau sur tablier, navigation autorisée »

	Classe de navigation	Trafic (marchandises et hors marchandises)	Type de ponts	Hauteur libre	Note finale C obtenue
Situation 1	Classe VII	Important	Ponts à poutres	6,5 m	19,98
Situation 2	Classe VII	Important	Ponts à poutres	7,5 m	6,32
Situation 3	Classe VII	Important	Ponts à poutres	8,5 m	0
Situation 4	Classe IV	Important	Ponts à poutres	5 m	13,08
Situation 5	Classe IV	Faible	Ponts à poutres	5 m	4,36
Situation 6	Classe IV	Important	Ponts à poutres	5,5 m	4,13
Situation 7	Classe IV	Important	Ponts à poutres	6,5 m	0
Situation 8	Classe VI	Important	Ponts à poutres	8,5 m	0
Situation 9	Classe VI	Important	Ponts à poutres	7,5 m	5,34
Situation 10	Classe VI	Important	Pont maçonnerie	6,06 m (hauteur réévaluée due à la géométrie de la voûte)	16,89

Les situations 3, 7 et 8 correspondent à des situations où l'aléa semble faible. Les situations 2, 5, 6 et 9 seraient plutôt à classer en aléa moyen, tandis que les situations 1, 4 et 10 correspondent à des situations où l'aléa semble élevé.

À partir de ces analyses, les intervalles suivants pour l'évaluation du niveau d'aléa sont proposés :

Tableau 26 : Évaluation de l'aléa « choc de bateau – choc sur tablier, navigation autorisée »

$0 \leq C \leq 4$	Faible
$4 < C \leq 10$	Moyen
$10 < C \leq 20$	Élevé

1.2.4.4 - Choc sur tablier lié à une rupture d'amarre

On retient les mêmes notions qu'au paragraphe précédent. L'aléa est maintenant évalué par la lettre D.

■ Possibilité physique d'un choc :

Aucun trafic fluvial n'est autorisé. Dans ces conditions, la possibilité physique d'un choc n'existe que pour des navires amarrés en amont. Le système d'évaluation suivant est retenu :

Tableau 27 : Évaluation du critère « possibilité physique d'un choc » – choc sur tablier lié à une rupture d'amarre

Situation de l'ouvrage	Notation
Aucun navire amarré en amont	$D_1 = 0$
Cas contraire	1

Pour tenir compte de la masse des navires, on considère à nouveau la classe de trafic des navires autorisés à circuler en période de crue. Par ailleurs, la vitesse des navires en perte de vitesse est celle de la vitesse du courant.

Le système de notation proposé est le suivant :

Tableau 28 : Évaluation du critère « intensité du choc » – choc sur tablier lié à une rupture d'amarre

Masse des navires		Notation
Navires autres que marchandises		$D_{2, \text{autres que marchandises}} = 1$
Classe du trafic (selon circulaire 95-86) (trafic éventuellement dégradé par la crue)	Classe 0 ou Classe I	$D_{2, \text{classe I}} = 1$
	Classe II	$D_{2, \text{classe II}} = 2$
	Classes III et IV	$D_{2, \text{classes III \& IV}} = 3$
	Classes V et VI	$D_{2, \text{classes V \& VI}} = 5$
	Classe VII	$D_{2, \text{classe VII}} = 7$
Vitesse des navires		Notation
Vitesse du trafic fluvial	De 0 à 2,5 km/h	$D_{3, 0-2,5 \text{ km/h}} = 1$
	De 2,5 à 5 km/h	$D_{3, 2,5-5 \text{ km/h}} = 4$
	De 5 à 7,5 km/h	$D_{3, 5-7,5 \text{ km/h}} = 9$
	De 7,5 à 10 km/h	$D_{3, 7,5-10 \text{ km/h}} = 16$
	> 10 km/h	$D_{3, >10 \text{ km/h}} = 20$

■ Probabilité d'occurrence du choc :

La probabilité d'occurrence d'un choc va dépendre de la hauteur résiduelle de la passe de navigation sous la crue mais aussi du nombre de bateaux à l'amarrage en amont de l'ouvrage. Ces points sont évalués par l'intermédiaire des notes D_4 et D_5 .

Hauteur résiduelle de la passe de navigation (note D_4) :

Un choc sur tablier n'est possible que si la hauteur résiduelle de la passe de navigation descend sous un certain seuil. On reprend les principes énoncés au paragraphe précédent, avec les adaptations suivantes : pour une hauteur libre résiduelle située sous la valeur limite, on distingue le cas où la hauteur libre est supérieure à la limite moins 1 m, pour laquelle on considère que le choc est moins important que si la hauteur est inférieure à ce seuil. Dans le premier cas, on fixe alors $D_4 = 5$ et dans le second cas $D_4 = 10$.

Le système d'évaluation retenu est le suivant :

Tableau 29 : Évaluation du critère « probabilité d'occurrence du choc » – choc sur tablier lié à une rupture d'amarre

Hauteur libre résiduelle de l'ouvrage (en m)		Notation
Navires autres que marchandises, classe 0 ou classe I	$H_r < 2,7$	$D_4 = 10$
	$2,7 \leq H_r < 3,7$	$D_4 = 5$
	$3,7 \leq H_r < 4,7$	$D_4 = 1$
	$4,7 \leq H_r$	$D_4 = 0$
Classe II ou classe III	$H_r < 3,1$	$D_4 = 10$
	$3,1 \leq H_r < 4,1$	$D_4 = 5$
	$4,1 \leq H_r < 5,1$	$D_4 = 1$
	$5,1 \leq H_r$	$D_4 = 0$
Classes IV	$H_r < 4,25$	$D_4 = 10$
	$4,25 \leq H_r < 5,25$	$D_4 = 5$
	$5,25 \leq H_r < 6,25$	$D_4 = 1$
	$6,25 \leq H_r$	$D_4 = 0$
Classes V et VI	$H_r < 6$	$D_4 = 10$
	$6 \leq H_r < 7$	$D_4 = 5$
	$7 \leq H_r < 8$	$D_4 = 1$
	$8 \leq H_r$	$D_4 = 0$
Classe VII	$H_r < 6$	$D_4 = 10$
	$6 \leq H_r < 7$	$D_4 = 5$
	$7 \leq H_r < 8$	$D_4 = 1$
	$8 \leq H_r$	$D_4 = 0$

Nombre de bateaux à l'amarrage (note D_5) :

La densité de navires amarrés est corrélée d'une part à l'intensité du trafic portuaire et d'autre part à la présence ou non de zones urbanisées (cf. tableau 30). La note D_5 est obtenue en considérant le maximum des sous-indices D_{51} et D_{52} : $D_5 = \text{Max}(D_{51} ; D_{52})$.

Tableau 30 : Évaluation du critère « probabilité d'occurrence du choc » – choc sur tablier lié à une rupture d'amarre – note D_5

Trafic		Notation
Densité du trafic de marchandises	Important	$D_{51} = 1$
	Faible	$D_{51} = 0,3$
Type de berges		Notation
Berges urbanisées		$D_{52} = 1$
Berges de campagne		$D_{52} = 0,3$

Note finale « choc sur tablier, lié à une rupture d'amarre (navigation non autorisée) » :

L'aléa « choc sur tablier, lié à une rupture d'amarre », notée D , est évalué à partir du produit $D_1 \cdot D_2 \cdot D_3 \cdot D_4$, dont la valeur varie entre 0 (aucun choc possible) et 1 400 (aléa maximal). Comme précédemment, la note finale est obtenue en appliquant la formule suivante :

$$D = 0,535 \cdot \sqrt{D_1 \cdot D_2 \cdot D_3 \cdot D_4}$$

où le coefficient 0,535 est calibré pour ramener la note dans un intervalle allant de 0 à 20 ($0,535 \sqrt{1400} = 20$).

Plusieurs situations représentatives ont été considérées afin de fixer les intervalles de niveau élevé, moyen et faible (cf. tableau 31) :

Tableau 31 : Définition des bornes pour l'évaluation de l'aléa « choc de bateau sur tablier lié à une rupture d'amarre »

	Classe de navigation	Vitesse du courant	Type de ponts	Hauteur libre	Note finale D obtenue
Situation 1	Classe VII	2,9 m/s	Ponts à poutres	5 m	20
Situation 2	Classe VII	2,9 m/s	Ponts à poutres	6 m	14,15
Situation 3	Classe VII	0,6 m/s	Ponts à poutres	6 m	3,17
Situation 4	Classe VII	2,9 m/s	Ponts à poutres	7 m	6,33
Situation 5	Classe VII	2,9 m/s	Ponts à poutres	8 m	0
Situation 6	Navires autres que marchandises	2,9 m/s	Ponts à poutres	2,5 m	7,57
Situation 7	Navires autres que marchandises	2,9 m/s	Ponts à poutres	3,5 m	5,35
Situation 8	Navires autres que marchandises	2,9 m/s	Ponts à poutres	4,5 m	2,39
Situation 9	Navires autres que marchandises	2,9 m/s	Ponts à poutres	5,5 m	0
Situation 10	Navires autres que marchandises	0,6 m/s	Ponts à poutres	2,5 m	1,69
Situation 11	Navires autres que marchandises	0,6 m/s	Ponts à poutres	3,5 m	1,19
Situation 12	Navires autres que marchandises	0,6 m/s	Ponts à poutres	4,5 m	0,54

Les situations 5, 8, 9, 10, 11 et 12 correspondent à des situations où l'aléa semble faible. Les situations 3, 4, 6 et 7 seraient plutôt à classer en aléa moyen, tandis que les situations 1 et 2 correspondent à des situations où l'aléa semble élevé.

À partir de ces analyses, les intervalles suivants pour l'évaluation du niveau d'aléa sont proposés :

Tableau 32 : Évaluation de l'aléa « Choc de bateau – choc sur tablier lié à une rupture d'amarre »

$0 \leq D \leq 3$	Faible
$3 < D \leq 10$	Moyen
$10 < D \leq 20$	Élevé

1.2.4.5 - Passe bloquée par un bateau ayant rompu son amarre

Un bateau a pu se mettre en travers d'une passe suite à un choc sur l'ouvrage. Il est alors à l'origine d'une poussée hydraulique sur les piles de l'ouvrage, car il fait obstacle au bon écoulement de l'eau.

Les critères d'aléa considérés sont alors les suivants :

- possibilité physique d'un blocage de passe ;
- intensité de la poussée exercée sur les piles par l'obstruction d'une passe ;
- probabilité d'occurrence de l'obstruction d'une passe.

Pour chaque critère, un système de notation est proposé permettant ensuite une classification en trois catégories (faible, moyen, élevé) de l'aléa étudié.

■ Possibilité physique d'un blocage de passe :

Dans le cas considéré, si aucun navire n'est amarré en amont, la probabilité d'obstruction d'une passe est nulle. Le système de notation suivant est retenu :

Tableau 33 : Évaluation du critère « possibilité physique d'un blocage de passe » – passe bloquée par un bateau ayant rompu son amarre

Situation de l'ouvrage	Notation
Aucun navire amarré en amont	$E_1 = 0$
Cas contraire	1

■ Intensité de la poussée exercée sur les piles par l'obstruction d'une passe :

La note E_2 est calculée en fonction de l'intensité de la poussée s'exerçant sur les piles suite au blocage d'une passe par un bateau. Cette intensité est calculée en considérant que le bateau se comporte, vis-à-vis de la pile, comme un embâcle. La force liée au bateau peut alors être calculée suivant la formule donnée par l'Eurocode 1 (cf. NF EN 1991-1-6 [9]) concernant les embâcles :

$$F_{deb} = k_{deb} A_{deb} v^2$$

Avec : k_{deb} : un paramètre de masse volumique des débris dont la valeur recommandée par l'EN 1991-1-6 est de 666 kg/m³. Comme dans notre cas l'embâcle est un bateau, nous pouvons considérer que cette masse volumique doit être prise égale à celle de l'eau, à savoir 1 000 kg/m³ (le bateau est rigide et transmettra toute la force de poussée liée à l'eau aux piles).

v : la vitesse de moyenne de l'eau lors de l'écoulement de la crue.

A_{deb} : l'aire d'obstruction, qui est prise ici égale à l'aire immergée du bateau, soit sa longueur L multipliée par son tirant d'eau t .

La valeur du tirant d'eau est calculée à partir de la longueur L , de la largeur l et de la masse m maximales du navire, en fonction de la classe de navire retenue :

$$t = \frac{m}{\rho_{H_2O} \cdot L \cdot l}, \text{ où } \rho_{H_2O} \text{ est la masse volumique de l'eau.}$$

Finalement, la note E_2 est calculée via l'équation suivante : $E_2 = E(F_{deb}/50kN) + 1$, où $E(x)$ représente la partie entière de x . Cette valeur est bornée ici arbitrairement à 10.

Le tableau 34 donne des indications sur la largeur retenue des bateaux et sur leur masse en fonction de la classe de navigation. Ces valeurs sont utiles aux calculs des formules précédentes.

Tableau 34 : Évaluation du critère « intensité de la poussée exercée sur les piles » – passe bloquée par un bateau ayant rompu son amarre

		Masse des navires
Navires autres que marchandises		300 t
Classe du trafic (selon circulaire 95-86) <i>(trafic éventuellement dégradé par la crue)</i>	Classe 0 et Classe I	300 t
	Classe II	650 t
	Classe III	1 000 t
	Classe IV	1 500 t
	Classe V	3 000 t
	Classe VI	5 000 t
	Classe VII	10 000 t
		Largeur retenue des bateaux
Navires autres que marchandises		5,05 m
Classe du trafic (selon circulaire 95-86) <i>(trafic éventuellement dégradé par la crue)</i>	Classe 0 et Classe I	5,05 m
	Classe II	6,6 m
	Classe III	8,20 m
	Classe IV	9,5 m
	Classes V et VI	11,4 m
	Classe VII	11,4 m

■ Probabilité d'occurrence de l'obstruction d'une passe :

La probabilité d'occurrence d'une obstruction de la passe est évaluée en fonction de la largeur de la passe de navigation et du nombre de bateaux à l'amarrage en amont de l'ouvrage. Ces points sont évalués par l'intermédiaire des notes E_3 et E_4 .

Largeur de la passe de navigation (note E_3) :

Pour qu'une passe soit obstruée par un bateau, il faut que celui-ci ait une longueur suffisante pour se mettre en appui sur au moins deux piles.

Dès lors que le bateau choque une pile et pivote autour de celle-ci, sa longueur peut être suffisante pour se mettre en butée contre la pile adjacente et ainsi bloquer la passe. Si le bateau a une longueur supérieure à deux fois l'ouverture de la passe, on considère qu'il bloque obligatoirement la passe dès lors qu'il choque une pile et pivote autour d'elle. Dans le cas où sa longueur est comprise entre une fois l'ouverture de la passe et deux fois cette ouverture, il peut réussir à franchir la passe sans la bloquer mais la probabilité de blocage augmente alors avec la longueur du bateau. Ce raisonnement simplifié est conduit en supposant un pont avec des travées de largeur identique.

Suivant la classe de navigation des bateaux amarrés à l'amont de l'ouvrage, on retient une longueur de bateau correspondant à la longueur maximale des bateaux rencontrés pour la classe retenue. Les longueurs maximales des navires en fonction de la classe de navigation sont données dans le tableau 35.

Tableau 35 : Longueurs maximales des navires en fonction de la classe de navigation

		Longueur maximale des navires
Navires autres que marchandises		38,5 m
Classe du trafic (selon circulaire 95-86) <i>(trafic éventuellement dégradé par la crue)</i>	Classe 0 ou Classe I	38,5 m
	Classe II	50 m
	Classes III et IV	105 m
	Classes V et VI	180 m
	Classe VII	180 m

L'ouverture de passe retenue correspond à la moyenne de l'ouverture minimale des passes navigables et l'ouverture minimale des passes non navigables. Suivant la valeur du rapport de la longueur retenue des navires et de l'ouverture moyenne, la note E_3 est calculée, aboutissant au système de notation suivant :

Tableau 36 : Évaluation du critère « probabilité d'occurrence de l'obstruction d'une passe » – passe bloquée par un bateau ayant rompu son amarre

		Notation
Rapport = $\frac{\text{Longueur bateau}}{\text{ouverture moyenne des passes}}$	$R < 1$	$E_3 = 0$
	$1 \leq R < 1,25$	$E_3 = 4$
	$1,25 \leq R < 1,5$	$E_3 = 5$
	$1,5 \leq R < 1,75$	$E_3 = 6$
	$1,75 \leq R < 2$	$E_3 = 7$
	$2 < R$	$E_3 = 10$

Nombre de bateaux à l'amarrage (note E_4) :

De manière similaire au cas d'un choc sur pile lié à une rupture d'amarre, la densité de navires amarrés va être corrélée d'une part à l'intensité du trafic portuaire et d'autre part à la présence ou non de zones urbanisées (cf. tableau 37). La note E_4 est obtenue en considérant le maximum des sous-indices E_{41} et E_{42} : $E_4 = \text{Max}(E_{41} ; E_{42})$.

Tableau 37 : Évaluation du critère « probabilité d'occurrence du choc » – passe bloquée par un bateau ayant rompu son amarre – note E_4

Trafic		Notation
Densité du trafic de marchandises	Important	$E_{41} = 1$
	Faible	$E_{41} = 0,3$
Type de berges		Notation
Berges urbanisées		$E_{42} = 1$
Berges de campagne		$E_{42} = 0,3$

Note finale « blocage d'une passe par un bateau ayant rompu son amarre » :

L'aléa « blocage d'une passe par un bateau ayant rompu son amarre », notée E , est évalué à partir du produit $E_1 \cdot E_2 \cdot E_3 \cdot E_4$, dont la valeur varie entre 0 (aucun choc possible) et 100 (aléa maximal).

Pour obtenir une note comprise dans un intervalle allant de 0 à 20, on applique la formule suivante :

$$E = (E_1 \cdot E_2 \cdot E_3 \cdot E_4) / 5$$

Les intervalles suivants pour l'évaluation du niveau d'aléa sont proposés :

Tableau 38 : Évaluation de l'aléa « choc de bateau – passe bloquée par un bateau ayant rompu son amarre »

$0 \leq E \leq 5$	Faible
$5 < E \leq 15$	Moyen
$15 < D \leq 20$	Élevé

1.3 - ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ

La vulnérabilité de l'ouvrage est évaluée pour chaque aléa (aléa « affouillement », aléa « poussée des eaux » et aléa « choc de bateau »). Les sous-parties suivantes donnent le détail de l'évaluation de la vulnérabilité pour chaque aléa considéré.

1.3.1 - VULNÉRABILITÉ VIS-À-VIS DE L'ALÉA « AFFOUILLEMENT »

La vulnérabilité d'un ouvrage vis-à-vis de l'aléa « affouillement » résulte d'un mécanisme d'endommagement « en chaîne ». Dans ce mécanisme, les fondations des appuis sont les premiers éléments de défaillance. Selon le niveau de mouvement de la fondation, il peut alors advenir en chaîne des désordres sur les appuis (piles et culées hors fondation) avec basculement partiel ou complet, éventuellement accéléré par l'effet de la poussée hydrodynamique du courant, rupture..., et non sur le tablier avec mise en torsion ou effondrement du tablier si la pile bascule ou rompt, augmentation conséquente des contraintes de flexion en cas de dénivellation d'appui, sauf dans le cas de structures de tablier très souples.

L'analyse proposée ci-dessous pour l'évaluation de la vulnérabilité à l'aléa « affouillement » repose donc sur une prise en compte de ce séquençage par le biais de trois indices relatifs respectivement à la vulnérabilité des fondations, puis à ses conséquences potentielles sur l'intégrité des appuis et du tablier.

Toujours selon ce mécanisme d'endommagement en chaîne, la défaillance potentielle des appuis (piles ou culées) et/ou du tablier, même s'il existe des configurations plus ou moins favorables, est à considérer davantage comme une conséquence de la défaillance des fondations que comme une source de vulnérabilité initiale. Par conséquent, en cas de vulnérabilité maximale des fondations, la vulnérabilité globale doit être considérée maximale indépendamment de la vulnérabilité intrinsèque des appuis ou du tablier (risque de perte totale d'un appui). Inversement, en cas de vulnérabilité minimale des fondations, la vulnérabilité globale doit être considérée minimale indépendamment de la vulnérabilité intrinsèque des appuis ou du tablier (aucun risque de déformation ou de déstabilisation de la structure).

Trois critères de vulnérabilité sont évalués :

- vulnérabilité des fondations ;
- sensibilité des appuis (piles et culées hors fondations) vis-à-vis d'une déstabilisation de leur fondation ;
- sensibilité du tablier aux dénivellations, basculement ou déchaussement partiel d'appui.

Pour chaque critère, plusieurs sous-critères sont évalués donnant lieu à un système de notation de chaque critère. Ce système de notation permet ensuite une classification en trois catégories (faible, moyen, élevé) de la vulnérabilité vis-à-vis de l'aléa « affouillement » étudié.

■ Vulnérabilité des fondations :

L'évaluation de la vulnérabilité des fondations repose sur trois sous-critères principaux :

- la période de construction des appuis, représentative de la prise en compte ou non de la problématique affouillement dans la conception de l'ouvrage ;
- le type de fondations : profondes, semi-profondes, superficielles à embase plus ou moins large, micropieux ;
- la réalisation ou non sur l'ouvrage d'une surveillance régulière et les conclusions de ces visites d'inspection.

Les poids respectifs affectés à chacun de ces critères et la « quantification » du potentiel de basculement des fondations superficielles, en fonction de l'excentrement des descentes de charges et résultant de la création d'une cavité sous la semelle, sont détaillés dans le tableau 39.

Tableau 39 : Évaluation de la vulnérabilité des fondations – aléa « affouillement »

Période de construction (ouvrage ou appuis si plus anciens)	Notation
Avant 1950	$V_{11} = 5$
1951-1975	$V_{11} = 3$
Après 1976	$V_{11} = 1$
Types de fondations	Notation
Profondes	$V_{12} = 1$
Superficielles fondées directement sur rocher sain	$V_{12} = 1$
Semi-profondes (y compris pieux bois et semelles sur gros béton)	$V_{12} = 3,5$
Superficielles à large embase ($e \leq B'/6$) fondées sur sols affouillables	$V_{12} = 4$
Superficielles à embase moyenne ($B'/6 < e \leq B'/3$) fondées sur sols affouillables	$V_{12} = 6$
Superficielles à embase étroite ($e > B'/3$) fondées sur sols affouillables	$V_{12} = 10$
Micropieux	$V_{12} = 10$
Fondations inconnues	$V_{12} = 10$
Surveillance	Notation
Visite récente (inspection ≤ 6 ans) > pas d'affouillement observée	$V_{13} = 0$
Visite récente (inspection ≤ 6 ans) > initiation d'affouillement observée*	$V_{13} = 2$
Fondations non inspectées depuis 7 à 10 ans	$V_{13} = 2$
Fondations non inspectées depuis plus de 10 ans	$V_{13} = 4$
*En cas de détection d'un phénomène d'affouillement important, l'ouvrage sort automatiquement de la phase d'analyse simplifiée du risque et entre dans une phase de « gestion du risque ».	

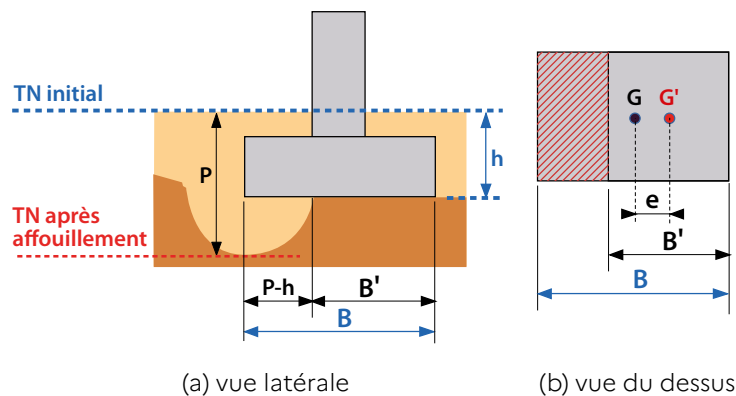
Nota : En cas d'absence de piles ou de culées en saillie dans le lit de la rivière, la vulnérabilité des fondations est prise égale à 0.

Le système d'évaluation de la vulnérabilité des fondations aboutit à la note suivante : $V_1 = V_{11} + V_{12} + V_{13}$. Dans cette analyse, il apparaît que l'évaluation du potentiel de basculement des fondations superficielles sur fond de lit nécessite la connaissance de deux données d'entrée supplémentaires :

- la largeur d'appui résiduelle B' de la semelle dans la direction concernée par l'affouillement (parallèlement à l'écoulement dans le cas d'une semelle de pile, perpendiculairement dans le cas d'une semelle de culée) ;
- le déplacement correspondant e du point d'application de la descente de charge.

En considérant en première approximation une cavité sous la semelle de la forme d'un quart de cylindre centré sur une de ses faces latérales, le phénomène, qui amorce un basculement de l'appui, peut être représenté de la manière suivante (figure 23) :

Figure 23 : Détermination des paramètres B' et e



Il vient : $B' = B - (P - h)$

$$e = y_G - y_{G'} = B/2 - B'/2 = (P - h)/2$$

Avec : P la profondeur totale d'affouillement évaluée au travers du module « aléa » défini plus haut ;

B la largeur de la semelle dans la direction concernée par l'affouillement (parallèlement à l'écoulement dans le cas d'une semelle de pile, perpendiculairement dans le cas d'une semelle de culée) ;

h la profondeur d'encastrement (ou côte de la sous-face) de la semelle comptée depuis la surface du fond de lit.

Suite à ces calculs, la semelle est alors considérée comme :

- stable (hypothèse de semelle à large embase) si l'excentrement de la charge reste dans le tiers central ($e \leq B'/6$) ;
- moyennement stable (hypothèse de semelle à embase moyenne) si l'excentrement de la charge reste compris entre le tiers central et 2 fois le tiers central ($B'/6 < e \leq B'/3$) ;
- instable (hypothèse de semelle à embase étroite) si l'excentrement de la charge sort de la zone correspondant à 2 fois le tiers central ($e > B'/3$).

Nota :

Le guide Cerema Analyse de risques des ponts en site affouillable [4] établit les **seuils limites entre fondations superficielles, semi-profondes et profondes**, de la manière suivante, notamment sur la base de leur élancement D/B (avec D la longueur de la fondation et B sa largeur) :

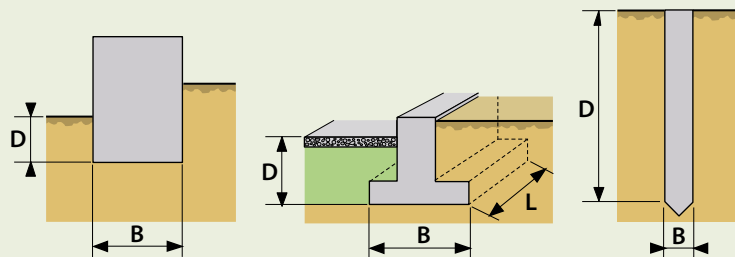
- Les fondations dites « **profondes** » se définissent par un élancement $D/B \geq 10$. Elles sont généralement constituées d'un ensemble de pieux ou barrettes (le cas d'un pieu unique est rare) solidarisés entre eux en partie supérieure par des poutres et blocs de calage (cas des ouvrages en maçonnerie) ou par une semelle en béton armé dans laquelle ils sont encastrés (ouvrages modernes). Dans le cas des ouvrages anciens, la longueur des pieux (en bois) dépasse rarement une douzaine de mètres et ils n'atteignent de ce fait pas toujours une couche de sol vraiment résistante. Les pieux métalliques ou en béton armé des ouvrages plus récents peuvent avoir des longueurs bien supérieures et atteignent beaucoup plus sûrement des horizons résistants. **Au stade d'analyse simplifiée de la présente approche méthodologique et de manière simplificatrice, est considérée conventionnellement comme fondation profonde, une fondation appuyée à au moins 6 à 8 m de profondeur sous le fond du lit (niveau de fondation), qu'elle soit massive ou constituée de pieux, et ancrée dans des terrains présentant une bonne résistance mécanique. Les micropieux, particulièrement sensibles au phénomène d'affouillement (risque de flambement par perte de résistance latérale du sol), n'entrent pas ici dans cette catégorie. Sauf cas exceptionnel, la profondeur du niveau de fondation n'est pas accessible par l'observation de terrain. Cette information peut être trouvée dans le dossier d'ouvrage.**
- Les fondations dites « **superficielles** » ne font que reposer sur le sol, ou s'y enfoncer très légèrement. Elles se définissent par un élancement $D/B < 4$ et leur profondeur n'excède généralement pas 3 mètres. Elles sont en principe constituées d'un massif en maçonnerie ou en béton, ou d'une semelle en béton armé. Les fondations récentes de ce type construites en rivière sont le plus souvent ceinturées par une enceinte en palplanches métalliques (batardeau) utilisée pour la construction de la fondation et laissée en place après travaux, et qui lui apporte une certaine protection vis-à-vis des affouillements. Le risque principal concernant les fondations superficielles est la survenance d'un affouillement atteignant un niveau inférieur à celui de la base de la fondation créant un vide partiel sous la fondation, lequel pouvant alors aboutir, dans le cas d'une assise résiduelle insuffisamment large, à un basculement de l'appui.
- Entre les deux extrêmes (fondations superficielles et profondes), on trouve les fondations **semi-profondes**, définies par un rapport d'élancement $4 \leq D/B < 10$. La base de ces fondations se situe au-dessus de la profondeur critique (seuil de stabilité de la résistance de pointe) et leur profondeur est généralement comprise entre 3 à 6 mètres (il peut s'agir par exemple de puits, ou encore de semelles en béton armé posées sur un massif de gros béton, etc.). **Dans le cadre de la présente méthodologie, lorsque des couches compressibles existent sur une grande hauteur et que le bon sol est pratiquement inaccessible, les fondations sur « pieux flottants » (dont la portance n'est assurée que par frottement latéral) sont également considérées comme appartenant à cette catégorie « intermédiaire », du fait de la perte de résistance par frottement latéral engendrée par l'affouillement des premières couches de sol.**

Les ouvrages anciens en maçonnerie sur fondations « profondes » en bois (ou les ouvrages plus récents mais fondés sur d'anciennes fondations) reposent sur des pieux qui restent généralement relativement courts et ceux-ci peuvent donc voir leur fiche (partie restant enterrée) fortement réduite en situation d'affouillement. Si ces pieux se trouvent régulièrement dégarnis sur leur partie supérieure, ils peuvent en outre être soumis à des phénomènes éventuels de pourrissement. Il en résulte alors une perte d'autant plus significative de leur capacité portante mais aussi de stabilité latérale, pouvant aboutir à un tassement ou un basculement de l'appui en particulier lors d'épisodes de crues. **On distinguera donc ici les pieux non dégarnis (considérés comme des fondations semi-profondes) des pieux dégarnis (considérés comme des fondations superficielles étroites en négligeant par défaut la contribution des pieux potentiellement fragilisés).** Les ouvrages récents fondés sur pieux ou barrettes bénéficient par contre très généralement de conditions de fondation beaucoup plus robustes vis-à-vis du risque d'affouillement. Beaucoup possèdent en effet des pieux forés profonds et de diamètre important. D'autre part, ils sont souvent protégés par le batardeau en palplanches métalliques ayant servis à leur construction, et **seront très généralement classés en fondations profondes.**

À noter également que la norme NF P94-261 « fondations superficielles » définit des seuils différents mais basés sur la hauteur d'encastrement équivalente D_e , paramètre conventionnel issu d'un calcul visant à négliger l'épaisseur des sols de couverture de faibles caractéristiques mécaniques ($D_e < D$) :

- **Fondation profonde (NF P94-262) :** le terme « fondations profondes » désigne des fondations par pieux, micropieux, barrettes ou puits dont l'élanement est élevé (typiquement des fondations dont la longueur est supérieure à 5 fois le diamètre ou la largeur : $D/B > 5$).
- **Fondation superficielle ou semi-profonde (NF P94-261) :** le terme « fondation superficielle » ou « fondation semi-profonde » désigne des fondations dont l'élanement est faible (typiquement inférieur à 5,0). La distinction entre une fondation superficielle et une fondation semi-profonde est en général basée sur la valeur d'encastrement équivalent D_e/B (avec D_e calculée selon l'Annexe C de la norme NF P94-261) : si la valeur de rapport est inférieure à 1,5 ($D_e/B < 1,5$), il s'agit d'une fondation superficielle ; si la valeur de ce rapport est comprise entre 1,5 et 5,0 ($1,5 < D_e/B < 5$), il s'agit d'une fondation semi-profonde.

Figure 24 : Paramètres d'élanement des fondations superficielles, semi-profondes ou profondes



En pratique, c'est la synthèse de ces différents critères qui permettra de statuer sur la nature des fondations à considérer.

À noter enfin que, **dans l'esprit du guide et compte tenu de sa finalité** (évaluation de la vulnérabilité à l'affouillement), **des fondations superficielles fondées dans du rocher sain sont considérées en termes de vulnérabilité comme des fondations profondes** (indice de vulnérabilité minimal).

Dans le même esprit, et afin de mieux dissocier le cas des fondations ancrées dans du rocher sain des autres cas (notamment pieux flottants considérés comme fondations semi-profondes, il est proposé ici de majorer légèrement les valeurs des indices V_{12} associés aux fondations semi-profondes et superficielles par rapport à celle proposées dans le guide Cerema Analyse de risques des ponts en site affouillable [4].

Toujours dans ce même tableau 39, **la mention marquée par un * de l'initiation d'un phénomène d'affouillement observée est à considérer uniquement si elle clairement indiquée dans le rapport d'IDP ou de visite subaquatique**. De ce cas, même si les conséquences sont moins graves pour des fondations profondes que superficielles ou semi-profondes, l'analyse prend néanmoins en compte cet aspect en raison de la réduction de la capacité de reprise des efforts par les fondations (pieux) du fait de la suppression du sol environnant.

■ Sensibilité des appuis (piles et culées hors fondations) vis-à-vis d'une déstabilisation de leur fondation :

L'évaluation de la vulnérabilité des fûts de piles et culées est essentiellement qualitative. Elle intègre à la fois sa capacité pressentie à supporter une légère rotation à la base en fonction de la nature du matériau constitutif (béton ou maçonnerie) et de l'état pathologique des appuis (y compris les éléments de protection éventuels), ainsi que sa sensibilité (ou exposition) aux effets de la poussée hydrodynamique en fonction de la forme (géométrie) de l'obstacle à l'écoulement. Le tableau 40 donne le système de notation retenu pour chaque critère.

Tableau 40 : Évaluation de la sensibilité des appuis vis-à-vis d'une déstabilisation de leur fondation – aléa « affouillement »

Matériau constitutif des appuis	Notation
Béton ou métal	$V_{21} = 1$
Maçonnerie	$V_{21} = 2$
Forme de l'obstacle	Notation
Avant-bec aiguisé	$V_{22} = 0$
Circulaire ou cylindrique	$V_{22} = 0,5$
Rectangulaire	$V_{22} = 1$
État des appuis (y compris éléments de protection éventuels)	Notation
1 ou 2 ou 2E	$V_{23} = 0$
3 ou 3U ou NE	$V_{23} = 1$

Ainsi le système d'évaluation de la sensibilité des appuis vis-à-vis d'une déstabilisation de leur fondation aboutit à la note suivante : $V_2 = V_{21} + V_{22} + V_{23}$.

Nota : S'agissant de la forme de l'obstacle, on s'intéresse ici à l'exposition de l'appui aux **effets de poussée hydrodynamique** généralement concomitants à la problématique affouillement. Par conséquent, la forme d'appui à considérer est celle qui règne sur la plus grande partie de la hauteur mouillée (**en général la forme des fûts de pile**).

■ **Sensibilité du tablier aux dénivellations, basculement ou déchaussement partiel d'appui :**

L'évaluation de la sensibilité du tablier aux dénivellations, basculement ou déchaussement partiel d'appui est évaluée essentiellement qualitativement à partir du type d'ouvrage :

- buse béton ou pont cadre : $V_3 = 1$;
- voûte en maçonnerie : $V_3 = 2$;
- autres cas : $V_3 = V_{31} + V_{32}$.

V_{31} et V_{32} représentent respectivement la sensibilité de la structure de tablier aux phénomènes de torsion et de flexion (structures d'autant plus vulnérables que moins souples selon la composante concernée). Le système de notation de V_{31} et V_{32} est donné dans le tableau 41.

Tableau 41 : Évaluation de la sensibilité du tablier aux dénivellations, basculement ou déchaussement partiel d'appui – aléa « affouillement »

Sensibilité du tablier à la torsion	Notation
Tablier caisson	$V_{31} = 1$
Autre	$V_{31} = 0$
Sensibilité du tablier à la flexion	Notation
Travées isostatiques (piles de hauteur < 6 m)	$V_{32} = 0$
Travées isostatiques (piles de hauteur ≥ 6 m)	$V_{32} = 1$
Travées hyperstatiques structure mixte	$V_{32} = 0,5$
Travées hyperstatiques structure béton	$V_{32} = 1$

Nota : Comme indiqué en introduction de cette partie relative à l'évaluation du niveau de vulnérabilité, les éléments suivants doivent être considérés :

- En cas de vulnérabilité minimale des fondations ($V_1 \leq 5$), la vulnérabilité globale de la structure est considérée minimale indépendamment de la vulnérabilité intrinsèque des appuis ou du tablier. Cela entraîne une vulnérabilité globale $V = V_1$. C'est le cas en particulier de fondations profondes ou semi-profondes réalisées après 1976.
- Dans les autres cas ($V_1 > 5$), la vulnérabilité globale de la structure intègre des conséquences potentielles d'un basculement partiel des fondations sur les appuis et le tablier. Dans ces conditions, la vulnérabilité globale vaut $V = V_1 + V_2 + V_3$.
- En cas de rotation de la base des piles du fait d'un affouillement des fondations, les tabliers à travées isostatiques reposant sur des piles de grande hauteur peuvent être exposés à un risque d'effondrement de travée par insuffisance de repos d'appui. Ce mécanisme a été en particulier à l'origine de l'effondrement d'une des travées d'accès du pont de Komsatos en Grèce en 2017 (figure 25). Ce retour d'expérience malheureux a conduit à pénaliser davantage les tabliers à travées isostatiques à partir d'une hauteur de pile supérieure ou égale à 6 mètres ($V_{32} = 1$ dans le tableau 41 ci-dessus) par rapport à la version initiale du guide Cerema Analyse de risques des ponts en site affouillable [4].

Figure 25 : Effondrement d'une des travées du pont de Komsatos en Grèce en 2017 après un échappement d'appui causé par la rotation de la base d'une pile sous l'effet de l'affouillement de sa fondation (Source : Egnatia Motorway)



■ Définitions des niveaux de vulnérabilité :

À partir de l'indice de vulnérabilité global $V = V_1 + V_2 + V_3$ évalué selon l'approche présentée ci-dessus, trois niveaux de vulnérabilité ont pu être proposés (cf. tableau 42). Comme pour l'aléa, les bornes associées ont été calibrées et validées à partir d'études menées sur différentes régions du territoire national, plus ou moins exposées.

Tableau 42 : Définitions des niveaux de vulnérabilité – aléa « affouillement »

$V \leq 8$	Faible
$8 < V \leq 12$	Moyen
$V > 12$	Élevé

Nota : Par rapport au guide Cerema Analyse de risques des ponts en site affouillable [4] et comme pour l'évaluation de l'aléa, le nombre de classes de vulnérabilité « affouillement » pour cette approche simplifiée semi-quantitative a ici été réduit de 5 à 3, par souci de cohérence avec les autres types d'aléas considérés dans le présent guide.

1.3.2 - VULNÉRABILITÉ VIS-À-VIS DE L'ALÉA « POUSSÉE DES EAUX »

Comme pour l'évaluation de l'aléa (cf. 1.2.3), une distinction entre ouvrages – hors voûtes et voûtes est réalisée.

1.3.2.1 - Ouvrages – hors voûtes

Trois critères de vulnérabilité sont évalués (identiques aux critères retenus pour l'aléa) :

- poussée des eaux sur les piles ;
- sensibilité des culées à la décrue ;
- poussée des eaux sur le tablier.

Pour chaque critère, plusieurs sous-critères sont évalués donnant lieu à un système d'évaluation de chaque critère de vulnérabilité vis-à-vis de l'aléa « poussée des eaux » étudié.

■ Poussée des eaux sur piles :

Deux sous-critères sont considérés afin d'évaluer la vulnérabilité des ouvrages vis-à-vis de la poussée des eaux sur piles : le dimensionnement ou non des piles aux chocs de bateaux et l'excentrement.

Dimensionnement ou non des piles aux chocs de bateaux (note A_1) :

Les appuis des ouvrages d'art construits après 1971 sur des axes de navigation de marchandises ont été dimensionnés aux chocs de bateaux et peuvent donc résister à des efforts plus importants que ceux dus à la poussée des eaux en cas de crue.

Si les voies sont utilisées pour de la navigation commerciale mais que les appuis des ouvrages ont été construits avant 1971, il n'est pas certain que ces appuis résistent à la poussée des eaux en cas de crue. Si les voies ne sont pas navigables ou si elles ne sont pas dédiées au transport de marchandises (par exemple, seulement dédiées aux bateaux « mouches »), les appuis des ouvrages n'ont, dans ce cas, pas été dimensionnés pour résister aux chocs de bateaux et ce quelle que soit leur date de construction. Il n'est donc pas certain que ces appuis résistent à la poussée des eaux en cas de crue.

Le système de notation suivant est alors retenu :

Tableau 43 : Système de notation pour le sous-critère « dimensionnement ou non des piles aux chocs de bateaux »

	Notation
Ouvrage construit après 1971 et navigation de marchandises	$A_1 = 0$
Autres	$A_1 = 1$

Excentrement (note A_2) :

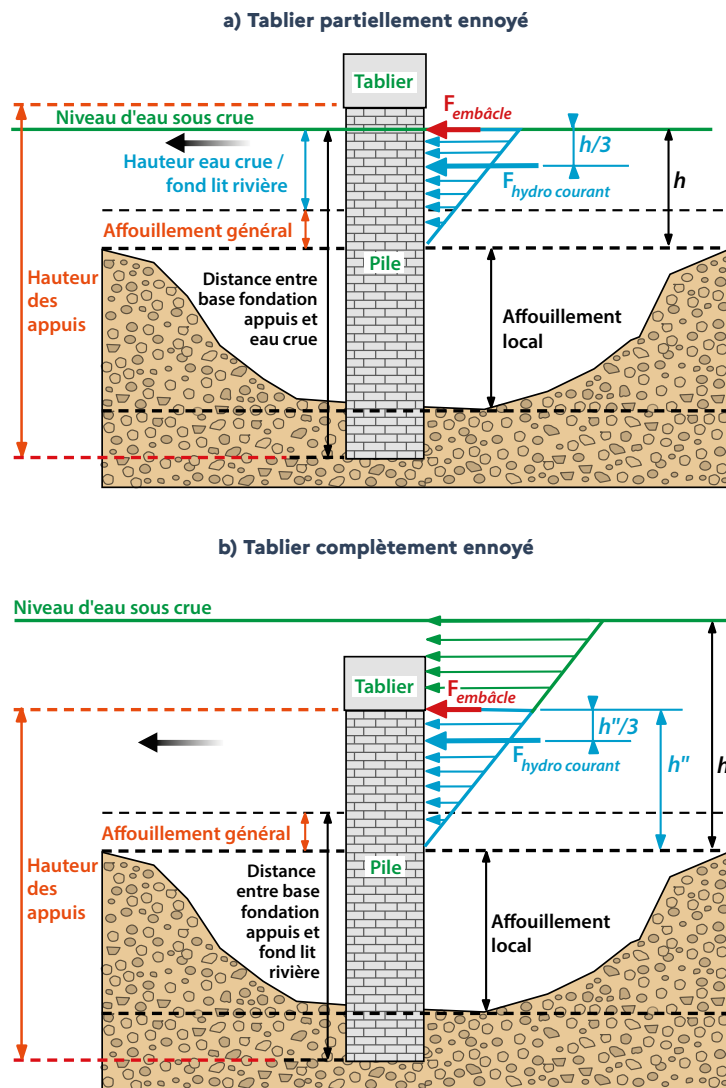
Moment total en pied de pile :

La force hydrodynamique due à la poussée du courant sur la pile et la force due à l'accumulation potentielle de débris (embâcles) ont été calculées lors de l'étude de l'aléa « Poussée des eaux sur la pile ». Afin d'obtenir le moment total en pied de pile, on calcule ici les bras de levier pour chacune de ces forces. On distingue deux cas :

- le cas où le niveau d'eau sous crue n'atteint pas le tablier ;
- le cas où le tablier est ennoyé (partiellement ou totalement).

Les points d'application des forces sont représentés sur la figure 26. Le moment total en pied de pile (en kN.m) correspond à la somme des produits de la force et du bras de levier associé, pour chacune des forces considérées.

Figure 26 : Points d'application de la force hydrodynamique due au courant sur la pile et de la force due à l'accumulation potentielle de débris :



Descente de charge sur appui :

Le poids des piles et du tablier constitue une action stabilisatrice permanente qui est à considérer pour l'étude de la vulnérabilité des piles de l'ouvrage. Ainsi, plus la descente de charge sur pile est importante, moins l'ouvrage est vulnérable vis-à-vis de la poussée hydrodynamique.

La descente de charge sur pile, observée en pied de pile, correspond à la somme algébrique du poids de la pile, du poids du tablier rapporté à cet appui à laquelle on soustrait la poussée d'Archimède s'exerçant sur les parties immergées de ces éléments.

Le poids de la pile est calculé à partir des dimensions de celle-ci, en supposant une masse volumique de 25 kN/m^3 . Le poids linéique du tablier peut également être calculé pour tous les types de tablier (cf. Annexe 2). On peut ainsi connaître le poids du tablier rapporté à un appui intermédiaire.

Le volume linéique du tablier est également calculé, permettant ainsi la détermination du volume du tablier rapporté à un appui intermédiaire. En connaissant l'épaisseur de tablier et la hauteur de tablier sous crue, il devient alors possible d'évaluer le volume du tablier sous l'eau et ensuite la poussée d'Archimède :

$$F = \rho_{eau} V_{déplacé} . g$$

Avec, ρ_{eau} la masse volumique de l'eau prise égale à 1 000 kg/m³ ;

$V_{déplacé}$: le volume du tablier sous l'eau (en m³). On considère par simplification :

$$V_{déplacé} = \frac{h_{tab \text{ sous crue}}}{h_{tab}} V_{tablier}$$

g : l'intensité de la pesanteur égale à 10 N/kg.

Excentrement :

L'excentrement (noté e) correspond au rapport entre le moment total en pied de pile et la descente de charge sur appui. On le compare à $B/6$ et $B/3$ avec B , dimension de la fondation de la pile selon la direction principale de l'écoulement. Le système de notation suivant est retenu :

Tableau 44 : Système de notation pour le sous-critère « excentrement »

	Notation
$e \leq B/6$	$A_2 = 0$
$B/6 < e \leq B/3$	$A_2 = 1$
$B/3 < e$	$A_2 = 2$

Évaluation du critère de vulnérabilité « poussée des eaux sur piles » – hors voûtes :

La note finale est obtenue par multiplication des notes A_1 et A_2 : $A = A_1 . A_2$. Les bornes suivantes sont retenues :

Tableau 45 : Évaluation du critère de vulnérabilité « poussée des eaux sur piles » – hors voûtes

$A = 0$	Faible
$A = 1$	Moyen
$A = 2$	Élevé

■ **Sensibilité des culées à la décrue :**

Si la décrue est rapide, les culées à mur de front sur des berges de campagne pour lesquelles l'assainissement présente des défauts d'entretien, peuvent subir des surpressions dues à l'eau. En zone urbanisée, l'imperméabilisation artificielle des sols rend ce phénomène moins prégnant. Compte tenu de ces considérations, le système de notation suivant est retenu :

Tableau 46 : Système de notation pour le critère « sensibilité des culées à la décrue » – hors voûtes

Types de berges	Notation
Berges urbanisées	$B_1 = 0$
Berges de campagne	$B_1 = 1$
Types de culées	Notation
Culées à mur de front	$B_2 = 1$
Autres	$B_2 = 0$
Drainage des remblais contigus	Notation
Dispositif inexistant ou défaillant ou non connu	$B_3 = 2$
Dispositif bien conçu et bien entretenu	$B_3 = 1$

Évaluation du critère de vulnérabilité « sensibilité des culées à la décrue » – hors voûtes :

Afin d'évaluer la vulnérabilité vis-à-vis du critère « sensibilité des culées à la décrue », on considère la note finale $B = B_1 \cdot B_2 \cdot B_3$. Cela aboutit au système d'évaluation suivant :

Tableau 47 : Évaluation du critère de vulnérabilité « sensibilité des culées à la décrue » – hors voûtes

$B = 0$	Faible
$B = 1$	Moyen
$B = 2$	Élevé

■ Poussée des eaux sur le tablier :

Trois sous-critères sont considérés afin d'évaluer la vulnérabilité vis-à-vis de la poussée des eaux sur le tablier : la présence de butées sur les sommiers d'appuis ou encastrement, la poussée latérale des eaux sur le tablier par rapport au poids déjaugé du tablier et la sensibilité du tablier à la décrue.

Présence de butées sur les sommiers d'appuis ou encastrement (note C_1) :

Si des butées sont présentes sur les sommiers d'appuis ou si le tablier est encasté sur ses appuis, le risque de glissement du tablier, sous l'effet de la poussée latérale des eaux, est drastiquement réduit, voire éliminé. On retient la notation suivante :

Tableau 48 : Système de notation du sous-critère « présence de butées sur les sommiers d'appuis ou encastrement »

	Notation
Butées sur sommiers d'appuis ou encastrement du tablier sur ses appuis	$C_1 = 0$
Autre	$C_1 = 1$

Poussée latérale des eaux sur le tablier par rapport au poids déjaugé du tablier (note C₂) :

Poussée des eaux sur le tablier :

La poussée des eaux sur le tablier a été calculée lors de l'étude de l'aléa « poussée des eaux sur le tablier » (cf. § 1.2.3).

Résultante verticale tenant compte de la poussée d'Archimède :

La résultante verticale tenant compte de la poussée d'Archimède est la différence entre le poids du tablier rapporté à un appui intermédiaire et la poussée d'Archimède s'exerçant sur ce tablier.

De manière similaire à la partie précédente, la poussée d'Archimède est évaluée via :

$$F = \rho_{eau} V_{déplacé} g$$

Avec, ρ_{eau} : la masse volumique de l'eau prise égale à 1 000 kg/m³ ;

$V_{déplacé}$: le volume du tablier sous l'eau (en m³). On considère :

$$V_{déplacé} = \frac{h_{tab\ sous\ crue}}{h_{tab}} V_{tablier}$$

g : l'intensité de la pesanteur égale à 10 N/kg.

Ratio poussée des eaux sur le tablier / poids déjaugé du tablier :

On peut considérer que tant que le ratio $R = \text{poussée latérale des eaux sur le tablier} / \text{poids déjaugé du tablier}$ reste inférieur à 20 %, l'ouvrage n'est pas vulnérable. Au-delà, on considère qu'il y a un risque de glissement/soulèvement du tablier. Le critère C₂ est donc le rapport de la poussée des eaux sur le tablier par la résultante verticale tenant compte de la poussée d'Archimède :

Tableau 49 : Système de notation du sous-critère « poussée latérale des eaux sur le tablier par rapport au poids déjaugé du tablier »

	Notation
R ≤ 20 %	C ₂ = 0
R > 20 %	C ₂ = 3

Sensibilité du tablier à la décrue (note C₃) :

Les tabliers de type caisson présentent une forte sensibilité à la décrue. Le poids de l'eau emprisonnée à l'intérieur du caisson en cas de remplissage peut être critique si la vitesse de vidange est inférieure à la décrue. Pour traiter de cet aspect, la note C₃ est proposée :

Tableau 50 : Système de notation du sous-critère « sensibilité du tablier à la décrue »

	Notation
Tablier de type caisson	C ₃ = 2
Autre	C ₃ = 0

Évaluation du critère de vulnérabilité « poussée des eaux sur le tablier » – hors voûtes :

Afin d'évaluer la vulnérabilité vis-à-vis du critère « poussée des eaux sur le tablier », on considère la note finale $C = C_1 C_2 + C_3$. Cela aboutit au système d'évaluation suivant :

Tableau 51 : Évaluation de la vulnérabilité vis-à-vis du critère « poussée des eaux sur le tablier » – hors voûtes

$C < 1$	Faible
$1 \leq C < 3$	Moyen
$C \geq 3$	Élevé

1.3.2.2 - Ouvrages voûtes

Seuls deux critères de vulnérabilité sont évalués dans le cas des ouvrages voûtes :

- poussée des eaux sur les piles et la voûte ;
- sensibilité des culées à la décrue.

Pour chaque critère, plusieurs sous-critères sont évalués donnant lieu à un système d'évaluation de chaque critère de vulnérabilité vis-à-vis de l'aléa « poussée des eaux » étudié.

■ Poussée des eaux sur les piles et la voûte :

Les deux sous-critères, « dimensionnement ou non des piles aux chocs de bateaux » et « excentrement », sont à nouveau considérés.

Dimensionnement ou non des piles aux chocs de bateaux (note A_1) :

Pour le sous-critère « dimensionnement ou non des piles aux chocs de bateaux » la détermination reste la même que pour les ouvrages « hors voûtes » et n'est donc pas détaillée ici (cf. §1.3.2.1).

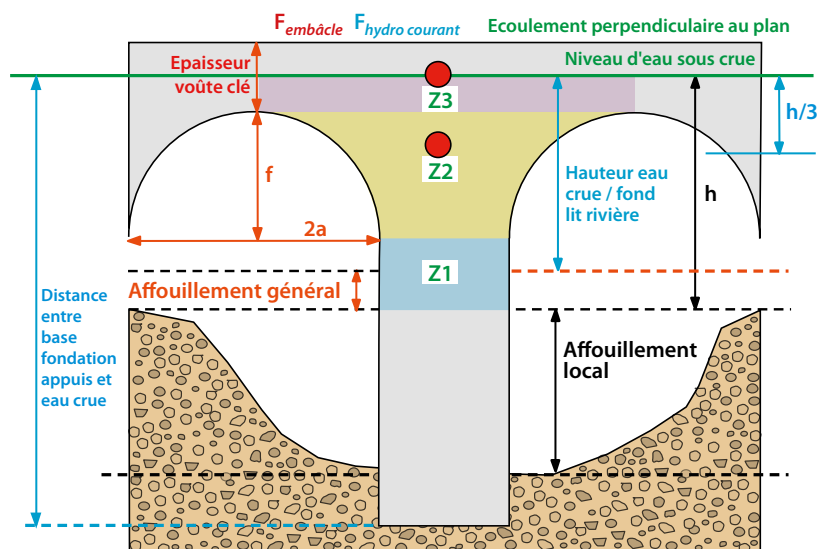
Excentrement (note A_2) :

Moment total en pied de pile :

La force hydrodynamique due aux courants sur la pile et la voûte et la force due à l'accumulation potentielle de débris (embâcles) ont été calculées lors de l'étude de l'aléa « Poussée des eaux sur la pile ».

On calcule ici les bras de levier pour chacune de ces forces permettant d'obtenir le moment total en pied de pile. Les points d'application des forces sont représentés sur la figure 27. Le moment total en pied de pile correspond alors à la somme des produits de la force et du bras de levier pour chacune des forces considérées.

Figure 27 : Points d'application de la force hydrodynamique due au courant sur la pile et de la force due à l'accumulation potentielle de débris pour un ouvrage voûte plein cintre et une crue au niveau de la voûte



Descente de charge sur appui :

La descente de charge sur pile, observée en pied de pile, correspond à la somme algébrique du poids de la pile et du poids de la voûte, rapporté à cet appui, réduite de l'éventuelle poussée d'Archimède s'exerçant ces éléments.

Le poids de la pile est calculé à partir des dimensions de celle-ci et en supposant une masse volumique de 25 kN/m³ pour les voûtes béton armé et une masse volumique de 22 kN/m³ pour les voûtes en maçonnerie. Le poids linéique de la voûte peut être calculé via l'application des formules de l'Annexe 2.

Excentrement :

L'excentrement correspond au rapport entre le moment total en pied de pile et la descente de charge sur appui. On le compare à $B/6$ et $B/3$ avec B , dimension de la fondation de la pile selon la direction principale de l'écoulement. La note A_2 vaut alors :

Tableau 52 : Système de notation du critère « excentrement » – ouvrages voûtes

	Notation
$e \leq B/6$	$A_2 = 0$
$B/6 < e \leq B/3$	$A_2 = 1$
$B/3 < e$	$A_2 = 2$

Évaluation du critère de vulnérabilité « poussée des eaux sur les piles et la voûte » - ouvrages voûte :

Afin d'évaluer la vulnérabilité vis-à-vis du critère « poussée des eaux sur les piles et la voûte », on considère la note finale $A = A_1 \cdot A_2$. Cela aboutit au système d'évaluation suivant :

Tableau 53 : Évaluation de la vulnérabilité vis-à-vis du critère « poussée des eaux sur les piles et la voûte » – ouvrages voûtes

A = 0	Faible
A = 1	Moyen
A = 2	Élevé

■ Sensibilité des culées à la décrue :

La sensibilité des culées à la décrue est traitée de manière similaire au cas des ouvrages hors voûte (cf. § 1.3.2.1) et n'est donc pas détaillée ici.

1.3.3 - VULNÉRABILITÉ VIS-À-VIS DE L'ALÉA « CHOC DE BATEAU »

La vulnérabilité vis-à-vis de l'aléa « choc de bateau » est examinée pour les trois situations suivantes :

- choc sur pile ;
- choc sur tablier ;
- cas d'une passe bloquée par un bateau ayant rompu ses amarres.

Pour chaque situation les différents critères de vulnérabilité sont définis et évalués. La vulnérabilité au choc de bateau pour chacune des situations considérées peut ensuite être évaluée selon les trois niveaux considérés (faible, moyen, élevé).

1.3.3.1 - Choc sur pile

Pour le critère « choc sur pile », la méthode proposée prend en compte des critères de vulnérabilité quantitatifs et qualitatifs. La vulnérabilité finale des piles vis-à-vis du choc de bateau est ensuite obtenue en croisant ces différents critères.

Critères qualitatifs :

Les critères qualitatifs considérés sont les suivants : l'année de conception de l'ouvrage, la nature des matériaux constituant les piles, la forme et la géométrie des piles, la typologie du tablier.

■ Année de conception de l'ouvrage (note A_1) :

Le choc sur pile a été pris en compte pour la première fois dans les règles de dimensionnement, à compter du fascicule 61 titre II, paru en 1971 [10]. Pour des ouvrages antérieurs à cette date, on peut alors considérer que la conception ne tient pas compte de ce type d'événement. Le système de notation proposé est donc :

Tableau 54 : Système de notation pour le critère qualitatif « année de conception de l'ouvrage »

	Notation
Ouvrage construit après 1971	$A_1 = 0$
Ouvrage construit avant 1971	$A_1 = 6$

■ Nature des matériaux constituant les piles (note A_2) :

En règle générale, les piles des ouvrages sont soit des piles en maçonnerie, soit des piles en béton armé, bien qu'il soit également possible de rencontrer des piles métalliques.

En cas de choc, le matériau présentant la résistance la plus élevée est le béton armé. La maçonnerie peut présenter une résistance localement moins élevée que le béton et est donc plus sensible au choc. Enfin, les piles en acier sont en général moins massives que les piles en béton ou en maçonnerie, entraînant une sensibilité au choc d'autant plus importante. Sur la base de ces considérations, le système de notation retenu est le suivant :

Tableau 55 : Système de notation pour le critère qualitatif « nature des matériaux constituant les piles »

	Notation
Pile en béton	$A_2 = 0$
Pile en maçonnerie	$A_2 = 1$
Pile en acier	$A_2 = 2$

■ Forme et géométrie des piles (notes A_3 et A_4) :

Plus les piles seront massives et larges, plus elles résisteront à un choc. L'aspect « massif » d'une pile peut être apprécié en distinguant les piles constituées d'un voile ou d'un fût unique, de celles constituées de fûts multiples. Cela aboutit au système de notation suivant :

**Tableau 56 : Système de notation pour le critère qualitatif
« forme et géométrie des piles »**

Largeur des piles	Notation
Largeur pile < 1,5 m	$A_3 = 4$
$1,5 \text{ m} \leq$ Largeur pile < 3 m	$A_3 = 2$
$3 \text{ m} \leq$ Largeur pile	$A_3 = 0$
Aspect « massif »	Notation
Pile constituée d'un voile ou d'un fût unique	$A_4 = 0$
Pile constituée de fûts multiples	$A_4 = 4$

■ **Typologie du tablier (notes A_5 et A_6) :**

La perte d'une pile sera plus grave pour un ouvrage hyperstatique que pour un ouvrage isostatique. Pour un ouvrage isostatique, la perte d'une pile entraîne au moins la perte des deux travées de part et d'autre de la pile. Ces travées, du fait de leur isostaticité, sont de plus capables de supporter un mouvement d'appui important sans endommagement et pourront probablement être récupérées en cas de réparation de la pile. Pour un ouvrage hyperstatique en revanche, la perte d'une pile induit des efforts très importants dans le tablier. Ces efforts ne sont pas admissibles pour la structure et la perte de l'ensemble du tablier est alors à redouter.

Par ailleurs, les ponts à poutres vont mieux supporter l'endommagement d'une pile que les tabliers plus massifs (dalle, caisson ou voûte). Dans ces conditions, le système de notation proposé est le suivant :

**Tableau 57 : Système de notation pour le critère qualitatif
« typologie du tablier »**

	Notation
Ouvrage hyperstatique	$A_5 = 3$
Ouvrage isostatique	$A_5 = 2$
	Notation
Tablier massif	$A_6 = 3$
Tablier non massif	$A_6 = 0$

Évaluation des critères qualitatifs de vulnérabilité des piles à un choc de bateau :

La note finale est obtenue par sommation des notes A_1 à A_6 : $A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6$. Cette note A permet d'évaluer qualitativement la vulnérabilité de l'ouvrage vis-à-vis d'un choc sur pile.

Les bornes suivantes sont alors retenues :

**Tableau 58 : Évaluation de la vulnérabilité des piles
à un choc – critères qualitatifs**

$A \leq 7$	Faible
$8 \leq A \leq 12$	Moyen
$A \geq 13$	Élevé

Critères quantitatifs :

Les critères qualitatifs considérés sont la décompression du sol de fondation et le glissement de la pile au niveau de sa fondation suite au choc.

■ **Décompression du sol de fondation :**

Dans un premier temps, l'excentrement de l'effort normal en pied de fondation, correspondant au rapport M/N (avec M le moment sollicitant lié au choc de bateau et N la réaction verticale liée aux descentes de charges permanentes, *i.e.* le poids du tablier) est calculé. Dans un deuxième temps, suivant la valeur de cet excentrement par rapport à la largeur des fondations, la vulnérabilité de l'ouvrage à un choc de bateau est évaluée.

À noter que la réaction verticale n'est calculée ici qu'avec le seul poids estimé du tablier, le poids des fondations étant négligé.

Moment sollicitant :

Le moment sollicitant est calculé à partir du choc de bateau sur la pile, en considérant que la poussée de l'eau s'exerce concomitamment à ce choc.

La valeur du moment lié à la poussée hydrodynamique considérée est la même que celle calculée dans la partie relative à la poussée des eaux.

Pour la valeur de choc lorsque le trafic fluvial est autorisé, on considère l'intensité du choc frontal donnée par l'Eurocode pour la classe maximale de trafic autorisée lors de la crue. Tandis que lorsque le trafic est interrompu, on considère la valeur du choc latéral de la classe maximale des bateaux amarrés à l'amont de l'ouvrage (cf. tableau 59).

La valeur de choc à considérer suite à une rupture d'amarres paraît alors moins élevée que dans le cas où la navigation est autorisée. En effet, le bateau étant en perdition et sans pilote, il est plus probable qu'il choque la pile par bâbord ou tribord plutôt que de face. La déformabilité du bateau est plus importante pour ce type de choc et donc l'intensité moins élevée. Les valeurs de choc données par l'Eurocode concernant les chocs latéraux couvrent théoriquement un choc de l'avant du bateau sur la face latérale d'une pile, mais nous considérons que ces valeurs représentent ici un choc de la face latérale d'un navire sur la face avant de la pile.

Tableau 59 : Intensité du choc prise en compte en fonction de la classe de navigation

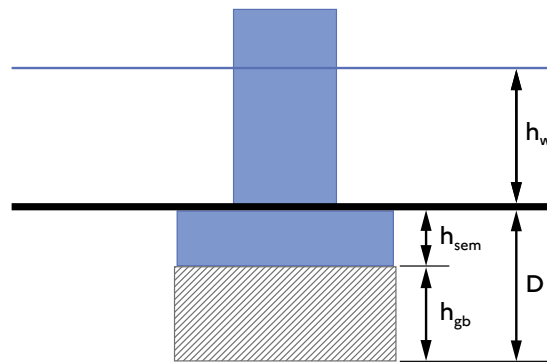
Navigation autorisée		Valeur du choc considérée (kN)
Navires autres que marchandises		2 000
Classe du trafic (selon circulaire 95-86)	Classe 0 et Classe I	2 000
	Classe II	3 000
	Classe III	4 000
	Classe IV	5 000
	Classe V	10 000
	Classes VI	15 000
	Classe VII	20 000
Rupture d'amarre		Valeur du choc considérée (kN)
Navires autres que marchandises		1 000
Classe du trafic (selon circulaire 95-86)	Classe 0 et Classe I	1 000
	Classe II	1 500
	Classe III	2 000
	Classe IV	2 500
	Classe V	4 000
	Classe VI	5 000
	Classe VII	10 000

La hauteur de choc considérée est située à 1,5 m au-dessus du niveau d'eau lors de la crue. Cette valeur est la valeur réglementaire de l'Eurocode. Par simplification, on considère que le choc est une force horizontale ponctuelle (dans l'Eurocode, le choc est considéré comme une force surfacique) avec un coefficient de sécurité de 1,0 (ELU accidentel). Par ailleurs, les effets dynamiques sont intégrés dans les valeurs d'effort.

Le calcul du moment est effectué au niveau de la base des fondations, à savoir la base de la semelle superficielle ou la base de la semelle de liaison suivant le type de fondation. À défaut de données sur la position de la base de la semelle, les valeurs suivantes sont considérées (cf. figure 28) :

- cas d'une fondation superficielle sur fond de lit : on considère que $D = h_{sem} = 2$ m, i.e. que la côte en sous face est égale à la côte de fond de lit moins 2 m ;
- cas d'une fondation superficielle posée sur massif de gros béton : $D = 3,33 + 0,66 \cdot h_w$ (en m). Cette relation est obtenue en considérant que $h_{gb} = 0,4 (D + h_w)$, où 0,4 est le rapport approximatif des masses volumiques de l'eau et du béton ;
- cas d'une fondation profonde : $D = 5$ m.

Figure 28 : Représentation schématique des fondations considérées



Effort normal sollicitant :

L'effort normal considéré est celui lié aux seules charges permanentes, en valeur nominale (i.e. avec un coefficient de sécurité de 1,0).

Le poids de l'ouvrage est évalué en fonction de sa typologie et des ratios usuellement utilisés en pré-dimensionnement (cf. Annexe 2).

Excentrement :

L'excentrement de l'effort normal en pied de fondation est alors évalué en calculant le rapport M/N .

On compare cet excentrement à la largeur B de la fondation (dans le sens transversal), cette largeur étant assimilée à la largeur du tablier.

Si l'excentrement (noté e) est inférieur à $B/6$, l'effort normal s'applique dans le tiers central de la fondation et on peut dès lors considérer que la fondation est apte à reprendre le choc : la vulnérabilité est donc faible. Si l'excentrement est supérieur à $B/3$, on considère que la fondation est trop décomprimée pour que l'effort de choc soit admissible : la vulnérabilité est alors élevée. Entre ces deux valeurs, la vulnérabilité est considérée comme moyenne.

On considère la répartition suivante des classes de vulnérabilité :

Tableau 60 : Évaluation de la vulnérabilité des piles vis-à-vis d'un choc – critère quantitatif « décompression du sol de fondation »

$e \leq B/6$	Faible
$B/6 \leq e \leq B/3$	Moyen
$e > B/3$	Élevé

Nota : Cette vérification est une vérification simplifiée, elle doit donc conduire au besoin, à une évaluation fine dont les résultats peuvent différer de ceux obtenus dans l'analyse proposée ici.

■ **Glissement de la pile au niveau de sa fondation :**

Un deuxième critère quantitatif qui peut être pris en compte concerne le glissement de la pile au niveau de sa fondation sous l'effort lié au choc.

Dans ce critère, l'effort horizontal H au niveau de la base de la fondation (lié aux efforts de choc de bateau et de poussée des eaux) est comparé à $V.Tan(\phi)/\gamma$, où V est l'effort vertical lié au poids de l'ouvrage, ϕ l'angle de frottement du sol (par défaut égal à 36°) et γ le coefficient de sécurité de la vérification.

Si H est inférieur à $V.Tan(\phi)/\gamma$ avec $\gamma = 1,2$, on peut dès lors considérer que la fondation est apte à reprendre le choc vis-à-vis du glissement : la vulnérabilité est donc faible. Si H est supérieur à $V.Tan(\phi)/\gamma$, avec $\gamma = 1,0$, on peut dès lors considérer que la fondation n'est pas apte à reprendre le choc vis-à-vis du glissement : la vulnérabilité est alors élevée. Entre ces deux valeurs, la vulnérabilité est considérée comme moyenne.

On considère la répartition suivante des classes de vulnérabilité :

Tableau 61 : Évaluation de la vulnérabilité des piles vis-à-vis d'un choc – critère quantitatif « glissement de la pile au niveau de sa fondation »

$H \leq V.Tan(\phi)/1,2$	Faible
$V.Tan(\phi)/1,2 \leq H \leq V.Tan(\phi)$	Moyen
$H > V.Tan(\phi)$	Élevé

Évaluation des critères quantitatifs de vulnérabilité des piles à un choc de bateau :

La vulnérabilité de la pile à un choc vis-à-vis des deux critères quantitatifs considérés, correspond à la vulnérabilité maximale obtenue en combinant ces deux critères.

Tableau 62 : Évaluation de la vulnérabilité des piles à un choc de bateau – combinaison des critères quantitatifs

Choc sur pile		Critère quantitatif : décompression du sol de fondation		
		Faible	Moyen	Élevé
Critère quantitatif : glissement de la pile au niveau de sa fondation	Faible	Faible	Moyen	Élevé
	Moyen	Moyen	Moyen	Élevé
	Élevé	Élevé	Élevé	Élevé

Évaluation de la vulnérabilité globale des piles à un choc de bateau :

Les analyses qualitatives et quantitatives se complètent, l'analyse qualitative venant modifier en complément les classes de vulnérabilité si les critères qualitatifs conduisent à une vulnérabilité élevée.

Le tableau suivant résume la détermination des classes de vulnérabilité finale vis-à-vis du choc sur pile, en fonction des deux analyses (qualitative et quantitative) précédemment menées :

Évaluation de la vulnérabilité globale des piles à un choc de bateau

Choc sur pile		Analyse qualitative		
		Faible	Moyen	Élevé
Analyse quantitative	Faible	Faible	Faible	Moyen
	Moyen	Moyen	Moyen	Élevé
	Élevé	Élevé	Élevé	Élevé

1.3.3.2 - Choc sur tablier

La vulnérabilité du tablier vis-à-vis du choc de bateau est évaluée en tenant compte uniquement de critères qualitatifs. Les critères considérés sont la nature des matériaux constituant le tablier et la typologie du tablier.

■ Nature des matériaux constituant le tablier (note B_1) :

Ce critère concerne davantage le cas des ouvrages métalliques pour lesquels un comportement fragile ou ductile du métal peut être observé en fonction du matériau utilisé et de la date de construction de l'ouvrage. Pour les autres matériaux, un comportement ductile (ou robuste vis-à-vis des chocs) est considéré. Ainsi, on retient le système de notation suivant :

Tableau 64 : Système de notation pour le critère qualitatif « nature des matériaux constituant le tablier » – vulnérabilité du tablier vis-à-vis du choc de bateau

	Notation
Métal fragile (fonte, fer puddlé, acier connu fragile). Pont avant 1900	$B_1 = 8$
Acier avant 1960 (se référer au fascicule 33 de l'ITSEOA pour l'aptitude au choc des aciers anciens)	$B_1 = 3$
Acier après 1960 (réputé ductile et tenace)	$B_1 = 0$
Acier connu ductile et tenace	$B_1 = 0$

■ Typologie du tablier (notes B_2 et B_3) :

Un ouvrage hyperstatique offre, en cas de choc sur le tablier, plus de possibilité de redistribution des efforts. Il est donc moins sensible à ce type de sollicitation qu'un ouvrage isostatique. Par ailleurs, les ponts massifs supporteront mieux un choc que les ponts à poutres. Le système de notation suivant est retenu :

Tableau 65 : Système de notation pour le critère qualitatif « typologie du tablier » – vulnérabilité du tablier vis-à-vis du choc de bateau

	Notation
Ouvrage hyperstatique	$B_2 = 0$
Ouvrage isostatique	$B_2 = 3$
	Notation
Tablier massif	$B_3 = 0$
Tablier non massif	$B_3 = 3$

Les typologies considérées comme ayant un tablier massif sont :

- les ponts en maçonnerie (éventuellement avec élargissement) ;
- les ponts voûtés en béton armé (éventuellement avec élargissement) ;
- les ponts cadres et portiques ;
- les ponts dalles (éventuellement nervurés, en béton armé ou précontraint) ;
- les ponts à poutrelles enrobées ;
- les ponts caisson en béton précontraint.

Évaluation qualitative de la vulnérabilité globale du tablier à un choc de bateau :

La note finale est obtenue par sommation des notes B_1 à B_3 : $B = B_1 + B_2 + B_3$. Cette note B permet d'évaluer qualitativement la vulnérabilité de l'ouvrage vis-à-vis d'un choc sur tablier.

Les bornes suivantes sont retenues :

Tableau 66 : Évaluation de la vulnérabilité globale du tablier à un choc de bateau

$B \leq 5$	Faible
$6 \leq B \leq 8$	Moyen
$B \geq 9$	Élevé

1.3.3.3 - Blocage de la passe par un bateau

Pour évaluer la vulnérabilité des piles vis-à-vis de la poussée liée au blocage d'une passe par un bateau, on évalue, de façon analogue à ce qui est fait pour le choc de navire sur les piles, la décompression du sol de fondation et le glissement de la pile au niveau du sol de fondation.

■ Décompression du sol de fondation :

Moment sollicitant :

Le moment sollicitant est calculé à partir de la poussée liée à un blocage de la passe par un bateau. Le calcul de la poussée est réalisé dans la partie relative à l'aléa « poussée des eaux », en considérant que la poussée sur les piles s'exerce concomitamment à cet effort.

La valeur du moment va être égale à l'effort exercé sur la pile, par un bateau bloqué dans la passe, multiplié par le bras de levier correspondant à la distance entre la base de la fondation (prise en compte de la même façon que l'évaluation de la vulnérabilité au choc sur piles) et le niveau considéré pour la poussée du bateau (*i.e.* égal au niveau de l'eau sous la crue étudiée moins la moitié du tirant d'eau du bateau).

Effort normal sollicitant :

L'effort normal considéré est celui lié aux seules charges permanentes, en valeur nominale (*i.e.* avec un coefficient de sécurité de 1,0).

Le poids de l'ouvrage est évalué en fonction de sa typologie et des ratios usuellement utilisés en pré-dimensionnement (cf. Annexe 2).

Excentrement :

L'excentrement de l'effort normal en pied de fondation est évalué en calculant le rapport M/N .

Cet excentrement est alors comparé à la largeur B de la fondation (dans le sens transversal), cette largeur étant assimilée à la largeur du tablier.

Si l'excentrement est inférieur à $B/6$, l'effort normal s'applique dans le tiers central de la fondation et on peut dès lors considérer que la fondation est apte à reprendre l'effort de poussée : la vulnérabilité est donc faible. Si l'excentrement est supérieur à $B/3$, on considère que la fondation est trop décomprimée pour que l'effort de poussée soit admissible : la vulnérabilité est alors élevée. Entre ces deux valeurs, la vulnérabilité est considérée comme moyenne.

La répartition suivante des classes de vulnérabilité est considérée :

Tableau 67 : Évaluation de la vulnérabilité des piles lors d'un blocage de la passe par un bateau – critère quantitatif « décompression du sol de fondation »

$e \leq B/6$	Faible
$B/6 \leq e \leq B/3$	Moyen
$e > B/3$	Élevé

Nota : Cette vérification est une vérification simplifiée, elle doit donc conduire au besoin, à une évaluation fine dont les résultats peuvent différer de ceux obtenus dans l'analyse proposée ici.

■ **Glissement de la pile au niveau de sa fondation :**

Ce deuxième critère quantitatif est traité de manière identique au cas de la vulnérabilité des piles vis-à-vis d'un choc. Pour cette raison, seule la répartition des classes de vulnérabilité est rappelée ici :

Tableau 68 : Évaluation de la vulnérabilité des piles lors d'un blocage de la passe par un bateau – critère quantitatif « glissement de la pile au niveau de sa fondation »

$H \leq V.Tan(\phi)/1,2$	Faible
$V.Tan(\phi)/1,2 \leq H \leq V.Tan(\phi)$	Moyen
$H > V.Tan(\phi)$	Élevé

Évaluation quantitative de la vulnérabilité globale des piles lors d'un blocage de la passe par un bateau :

La vulnérabilité de la pile retenue correspond à la vulnérabilité maximale obtenue en combinant les deux critères étudiés.

Tableau 69 : Évaluation de la vulnérabilité des piles à un choc de bateau – combinaison des critères quantitatifs

Choc sur pile		Critère quantitatif : décompression du sol de fondation		
		Faible	Moyen	Élevé
Critère quantitatif : glissement de la pile au niveau de sa fondation	Faible	Faible	Moyen	Élevé
	Moyen	Moyen	Moyen	Élevé
	Élevé	Élevé	Élevé	Élevé

1.4 - ÉVALUATION DE LA CRITICITÉ

Le niveau de danger (ou criticité) est évalué directement par croisement des indices d'aléa et de vulnérabilité à l'aide d'une matrice 3x3. Pour chaque aléa étudié (affouillement, poussées des eaux, choc de bateau), l'évaluation de la criticité est donnée dans les parties suivantes.

1.4.1 - CRITICITÉ « AFFOUILLEMENT »

Le niveau de danger (ou criticité) vis-à-vis du risque « affouillement » est obtenu de manière classique par croisement des indices d'aléa et de vulnérabilité à l'aide de la matrice 3x3 suivante :

Tableau 70 : Évaluation de la criticité vis-à-vis du risque « affouillement »

Criticité		Vulnérabilité		
		Faible	Moyenne	Élevée
Aléa	Faible	Faible	Faible	Moyenne
	Moyen	Faible	Moyenne	Élevée
	Élevé	Moyenne	Élevée	Élevée

1.4.2 - CRITICITÉ « POUSSÉE DES EAUX »

Le niveau de danger (ou criticité) à la « poussée des eaux » est dans un premier temps évalué pour chaque critère d'aléa et de vulnérabilité étudié. Pour les ouvrages – hors voûtes, 3 critères sont donc évalués :

- criticité vis-à-vis de la poussée des eaux sur les piles – critère A ;
- criticité vis-à-vis de la sensibilité des culées à la décrue – critère B ;
- criticité vis-à-vis de la poussée des eaux sur le tablier – critère C.

Tandis que pour les ouvrages voûtes, seuls deux critères sont évalués :

- criticité vis-à-vis de la poussée des eaux sur les piles et la voûte – critère A ;
- criticité vis-à-vis de la sensibilité des culées à la décrue – critère B.

La criticité est évaluée directement par croisement des indices d'aléa et de vulnérabilité à l'aide d'une matrice 3x3. N'accordant pas la même importance au critère B par rapport aux critères A et C, deux matrices différentes sont proposées :

Tableau 71 : Évaluation de la criticité pour l'aléa « poussée des eaux » – critères A et C (ouvrages voûtes et hors voûtes)

Criticité		Vulnérabilité		
		Faible	Moyenne	Élevée
Aléa	Faible	Faible	Faible	Moyenne
	Moyen	Faible	Moyenne	Élevée
	Élevé	Moyenne	Élevée	Élevée

Tableau 72 : Évaluation de la criticité pour l'aléa « poussée des eaux » – critères B (ouvrages voûtes et hors voûtes)

Criticité		Vulnérabilité		
		Faible	Moyenne	Élevée
Aléa	Faible	Faible	Faible	Faible
	Moyen	Faible	Faible	Moyenne
	Élevé	Faible	Moyenne	Moyenne

Le niveau de criticité global de l'ouvrage correspond finalement à la criticité maximale obtenue pour les critères A et B dans le cas des ouvrages voûtes et à la criticité maximale obtenue pour les critères A, B et C dans le cas des ouvrages hors voûtes.

1.4.3 - CRITICITÉ « CHOC DE BATEAU »

La criticité pour chacune des cinq situations d'aléas suivantes est déterminée :

- criticité vis-à-vis du choc sur pile, navigation autorisée ;
- criticité vis-à-vis du choc sur pile, suite à rupture d'amarres ;
- criticité vis-à-vis du choc sur tablier, navigation autorisée ;
- criticité vis-à-vis du choc sur tablier, suite à rupture d'amarres ;
- criticité vis-à-vis du blocage d'une passe par un bateau ayant rompu ses amarres.

La classe de criticité est alors obtenue par croisement de l'aléa et de la vulnérabilité correspondante pour chaque situation.

Pour les chocs sur pile et sur tablier liés à la navigation ou suite à une rupture d'amarre, la matrice suivante est utilisée :

Tableau 73 : Évaluation de la criticité pour l'aléa « choc de bateau – sur pile et sur tablier, lié à la navigation ou à une rupture d'amarres »

Criticité		Vulnérabilité		
		Faible	Moyenne	Élevée
Aléa	Faible	Faible	Faible	Faible
	Moyen	Faible	Faible	Moyenne
	Élevé	Moyenne	Moyenne	Élevée

Pour le blocage de la passe par un bateau ayant rompu ses amarres, la matrice suivante est utilisée :

Tableau 74 : Évaluation de la criticité pour l'aléa « choc de bateau – blocage de la passe par un bateau ayant rompu ses amarres »

Criticité		Vulnérabilité		
		Faible	Moyenne	Élevée
Aléa	Faible	Faible	Faible	Moyenne
	Moyen	Faible	Moyenne	Élevée
	Élevé	Moyenne	Élevée	Élevée

1.5 - ÉVALUATION DU RISQUE

1.5.1 - ÉVALUATION DES ENJEUX (OU CONSÉQUENCES)

L'évaluation du niveau de risque résulte du croisement entre la criticité maximale calculée précédemment et les enjeux (ou conséquences) associées à l'ouvrage.

Pour cela, les conséquences sont évaluées en reprenant strictement la démarche du guide Cerema *Analyse de risques des ponts en site affouillable* [4]. Dans cette démarche, les enjeux représentent la perte socio-économique pour les gestionnaires et la collectivité qu'engendrerait un effondrement du pont ou une réduction de son niveau de service, ainsi que les potentielles pertes humaines. Ces enjeux prennent en considération aussi bien l'implantation de l'ouvrage au sein d'un réseau, que son coût financier ou sa valeur patrimoniale et sont évalués à partir d'une adaptation des quatre critères issus de la méthode générale d'analyse des risques appliquée aux ouvrages d'art [1] à la problématique des crues et inondations :

- critère A : importance de l'itinéraire porté par l'ouvrage ;
- critère B : trafic sur la voie portée ;
- critère C : valeur patrimoniale de l'ouvrage ;
- critère D : conséquences d'une réduction du niveau de service.

1.5.1.1 - Importance de la voie portée (critère A)

Ce premier critère représente la valeur stratégique de l'itinéraire porté par l'ouvrage. Il relève de la hiérarchisation du réseau routier national et conduit à distinguer :

- les itinéraires très stratégiques : grands axes autoroutiers, tronçons urbains à forts enjeux, passages très fréquents de convois exceptionnels, desserte d'équipements stratégiques (centrale électrique, hôpital, caserne, aéroport, etc.) ;
- les itinéraires stratégiques : autres axes autoroutiers, tronçons interurbains à enjeux moyens, etc. ;
- les autres itinéraires.

En fonction des conséquences moyennes ou élevées que peuvent avoir des travaux sur l'ouvrage ou bien son effondrement sur le cours d'eau franchi, selon que l'ouvrage franchit une voie navigable ou une zone protégée par exemple, le critère A peut être augmenté de 1 ou 2 points :

- conséquences élevées (+2 points) ; il peut s'agir :
 - soit des cours d'eau navigables utilisés pour le transport de marchandises, la présence de travaux de réparation et de confortement de l'ouvrage perturbant alors le trafic sur la rivière,
 - soit des cours d'eau situés en zone protégée (parcs nationaux, zones Natura 2000, etc.) ;
- conséquences moyennes (+1 point) : il s'agit principalement des cours d'eau navigables utilisés à des fins touristiques et non commerciales.

De la même façon, si l'ouvrage porte des réseaux principaux (gaz, électricité, eau potable) essentiels en situation de crise ou s'il s'agit d'un ouvrage principal desservant une zone urbanisée sensible exposée au risque inondation (accès des secours, évacuation des populations, etc.), ce critère pourra être augmenté jusqu'à 2 points.

1.5.1.2 - Niveau de trafic (critère B)

Ce deuxième critère traduit les conséquences socio-économiques d'un effondrement de l'ouvrage. Celles-ci sont évaluées par le biais de l'importance du trafic supporté par l'ouvrage qui est un moyen simple de quantifier le surcoût qu'engendrerait sa fermeture. Il reprend en les adaptant légèrement les classes « traditionnelles » de trafic utilisées par les analyses des risques.

1.5.1.3 - Valeur patrimoniale de l'ouvrage (critère C)

La surface du tablier permet une bonne approximation du coût financier de construction de l'ouvrage et/ou de réparation. Le critère tient également compte le cas échéant du classement de l'ouvrage au patrimoine historique.

1.5.1.4 - Conséquences sur le niveau de service (critère D)

Ce critère prend en compte l'implantation de l'ouvrage dans le réseau routier et l'impact, en termes de report de trafic, qu'aurait sa fermeture vis-à-vis des usagers. L'utilisateur a alors le choix entre trois cas : déviation facile, difficile ou impossible. Intervient en outre, en fonction de la longueur de la brèche franchie, la possibilité ou non de mettre en place un pont de secours vis-à-vis d'une situation de crise.

Notas :

- *En cas de tabliers parallèles, trois cas de figure peuvent se présenter :*
 - **Cas 1 : Tabliers séparés reposant sur des appuis ou des fondations communes :** les ouvrages sont à considérer comme un seul et même ouvrage (cumul du trafic et des surfaces). Il n'y a pas de report possible de l'un vers l'autre en cas de défaillance ;
 - **Cas 2 : Ouvrages et appuis distincts mais jumeaux et parfaitement identiques** (même conception, même date de construction et même état) et soumis au même contexte d'exposition. Il n'y a dans ce cas aucune raison a priori qu'un des deux se comporte mieux que l'autre. Les ouvrages sont à considérer comme un seul et même ouvrage (cumul du trafic et des surfaces). Il n'y a pas de report possible de l'un vers l'autre en cas de défaillance ;
 - **Cas 3 : Ouvrages et appuis distincts et de conception ou contexte différents** (époque de construction, cotes de fondation ou état sensiblement différents) : les niveaux de vulnérabilité / criticité sont potentiellement différents pour chaque ouvrage. Les ouvrages sont à traiter comme deux ouvrages séparés indépendants (trafic et surface individuels), avec report possible uniquement du plus vers le moins vulnérable / critique.
- *Vis-à-vis du choix entre déviation facile et difficile, ce critère à évaluer en fonction de :*
 - l'allongement du temps ou de la distance de parcours entre deux échangeurs par la déviation ;
 - des caractéristiques de la voie de l'itinéraire alternatif (RN, RD, voie express, route communale, etc.) ;
 - des limitations de tonnage / gabarits (notamment vis-à-vis du passage des PL 44t) sur la déviation.

Cette donnée est théoriquement à consolider par les services d'exploitation du gestionnaire de l'infrastructure selon les itinéraires de délestage prévus.

Enfin, vis-à-vis des critères « longueur de brèche » et « site contraint », ces aspects sont à évaluer essentiellement en fonction de la possibilité ou non de mise en œuvre d'un pont de secours (40 m monotravée + accessibilité / stabilité des berges).

1.5.1.5 - Potentielles victimes directes associées à l'effondrement de l'ouvrage (critère E)

Ce critère tient compte de l'éventuelle présence d'une barrière physique interdisant l'accès à l'ouvrage en cas de crue, ainsi que des inspections systématiques éventuellement prévues (ou pas) suite à chaque épisode de crue important sur des ouvrages présumés vulnérables.

1.5.1.6 - Grille d'évaluation des enjeux

Les différents critères d'enjeux listés ci-dessus sont évalués sur la base de la grille du tableau 75 ci-après qui aboutit au calcul d'un indice socio-économique (ISE) permettant de définir trois niveaux de conséquences :

Tableau 75 : Évaluation des enjeux associés aux ouvrages en situation de crue [4]

Facteurs représentatifs des enjeux (adaptés légèrement à la problématique affouillements et crise inondation)	Critères	Cotation
A / Importance de la voie portée Fonction du caractère plus ou moins stratégique de l'itinéraire, des conséquences d'un effondrement sur le cours d'eau franchi et du rôle de l'ouvrage en cas de crise inondation	Cas général	0,5
	Stratégique	1
	Très stratégique	2
	Conséquences moyennes sur voie franchie	(+1)
	Conséquences élevées sur voie franchie	(+2)
	Ouvrage portant des réseaux essentiels en situation de crise ou desservant une zone urbanisée sensible exposée au risque inondation	(+2)
B / Niveau de trafic Conséquences socio-économiques fonction du trafic total sur la voie portée (intègre également indirectement le risque de victimes directes sur l'ouvrage en cas d'effondrement)	< 1 000 v/j	1
	entre 1 000 v/j et 15 000 v/j	1,5
	entre 15 000 v/j et 50 000 v/j	2
	> 50 000 v/j	2,5
C / Valeur patrimoniale de l'ouvrage Fonction notamment de la surface tablier et de la valeur patrimoniale de l'ouvrage	$S < 100 \text{ m}^2$	0,5
	$100 \leq S < 500 \text{ m}^2$	1
	$500 \leq S < 1 000 \text{ m}^2$	1,5
	$1 000 \leq S < 2 000 \text{ m}^2$	2
	$2 000 \text{ m}^2 \leq S$ ou valeur patrimoniale historique reconnue	2,5
D / Conséquence sur le niveau de service Facilité de mise en place d'une déviation ayant la capacité d'absorber le report de trafic, y compris pont de secours en situation de crise	Déviations faciles (pont attenants ou proches)	0
	Déviations difficiles (déviations longues)	1,5
	Déviations impossibles (aucun pont à proximité)	3
	Brèche > 40 m ou site contraint rendant impossible toute installation de pont de secours	(+2)
E / Potentielles victimes directement associées à l'effondrement de l'ouvrage Selon présence ou non de barrière physique prévue en cas de crue, et inspection systématique ou non suite à chaque épisode	Barrière physique prévue interdisant l'accès à l'ouvrage en cas de crue	0
	Cas général	2
	Ouvrage présumé vulnérable et n'ayant fait l'objet d'aucune inspection spécifique de ses fondations suite au dernier phénomène de crue important subi	4

Tableau 76 : Définition des trois niveaux de conséquences en fonction de l'indice socio-économique (ISE)

ISE < 8	Faible
8 ≤ ISE < 12	Moyen
ISE ≥ 12	Élevé

1.5.2 - ÉVALUATION DU NIVEAU DE RISQUE

Le niveau de risque est obtenu de manière classique par croisement des indices de criticité maximale et d'enjeux (ou conséquences) à l'aide de la matrice 3x3 suivante :

Tableau 77 : Évaluation du risque

Risque		Conséquences		
		Faibles	Moyennes	Élevées
Criticité (indice maximal)	Faible	Faible	Faible	Moyen
	Moyenne	Faible	Moyen	Élevé
	Élevée	Moyen	Élevé	Élevé

Nota : Le présent guide s'accompagne d'un outil sous forme de tableur semi-automatisé de saisie et d'exploitation des données. L'annexe 1 fournit quelques éléments relatifs à la construction de la base de données associée à cet outil.

En cas de méconnaissance de certaines données d'entrée nécessaires à l'analyse (nature et caractéristiques des fondations et des sols notamment), il est possible de renseigner ces données par défaut sur la base d'hypothèses défavorables.

Pour les ouvrages évalués par défaut, il est recommandé d'utiliser un code de représentation spécifique des résultats. Les niveaux de risque élevés ou moyens issus de l'analyse pour ces ouvrages pourront alors être éventuellement confirmés ou infirmés par des investigations complémentaires plus approfondies.



CHAPITRE 2

Recommandations générales pour les ouvrages présentant un risque élevé

RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES POUR LES OUVRAGES PRÉSENTANT UN RISQUE ÉLEVÉ

Pour les ouvrages dont le niveau de présomption de risque resterait élevé après affinage des entrants, une expertise détaillée est recommandée.

2.1 - RECOMMANDATIONS VIS-À-VIS DU RISQUE « AFFOUILLEMENT »

Dans l'objectif de gérer le risque « affouillement », plusieurs leviers d'actions sont envisageables [4] :

- mesures de surveillance/gestion de l'exploitation ;
- mise en œuvre de dispositifs de protection au droit des appuis ;
- modification des conditions hydrauliques et protections à distance.

2.1.1 - MESURES DE SURVEILLANCE/GESTION DE L'EXPLOITATION

Des inspections des fondations des ouvrages franchissant des cours d'eau doivent être préconisées de manière systématique. Quel que soit le type de sols sur lequel l'ouvrage est fondé et quelles qu'aient été les précautions constructives prises au niveau des appuis, des inspections régulières et détaillées des fondations des ouvrages sont à conduire.

Un maximum de 5 ans entre deux visites est conseillé. Pour pouvoir mener ces visites, les piles et culées doivent avoir été déblayées de tous corps flottants éventuels. Par ailleurs, l'inspection doit également tenir compte du fait que les sols ont pu être remaniés pendant les crues et que des désordres sous-jacents aux parties visibles des ouvrages peuvent exister. En effet, après la crue, les fonds peuvent reprendre leur physionomie antérieure, ce qui peut complètement masquer l'existence de phénomènes d'affouillement.

L'inspection détaillée périodique (en principe quinquennale) relève de la compétence d'une équipe spécialisée en fondations et ouvrages d'art, avec recours éventuel à une visite subaquatique et/ou un relevé bathymétrique au droit de l'ouvrage et plus particulièrement au droit de ses appuis. La fréquence de ces inspections peut être augmentée par le gestionnaire, en fonction de l'état de la structure et des risques évalués.

L'inspection détaillée exceptionnelle des fondations est rendue nécessaire soit par l'observation de faits anormaux non élucidés lors des inspections périodiques, soit dans le cadre de modifications prévues des conditions hydrauliques ou de service sur l'ouvrage, soit encore dans le souci de compléter les investigations par des moyens techniques spéciaux (dégarnissage, forages, mise à sec, etc.).

Certains pays comme le Japon, exposés à des événements climatiques extrêmes (typhons), pouvant engendrer des phénomènes d'affouillement très importants, ont expérimenté depuis quelques années des techniques de surveillance des ouvrages par mesures vibratoires. Ces techniques consistent à mesurer les chutes de fréquences des modes propres de vibration des piles, représentatives de la perte de rigidité du sol de fondation autour des appuis due au mécanisme de mise en suspension/redépose des matériaux du fond de lit lors des phénomènes d'affouillement (cf. figure 29).

Figure 29 : Mesure vibratoire d'une pile de pont au Japon destinée à quantifier la perte de rigidité des fondations liée au phénomène d'affouillement [11]
(Source : Japan Railway Technical Research Institute (RTRI))



Enfin, dans le cas d'ouvrages existants pour lesquels il existe une forte présomption de vulnérabilité vis-à-vis de l'aléa « affouillement », une approche basée sur la définition de seuils d'alerte hydrométéorologiques peut éventuellement être mise en œuvre et associée à des conditions de restriction de l'exploitation (coupure de tout ou partie de la circulation, limitation de tonnage, etc.).

2.1.2 - MISE EN ŒUVRE DE DISPOSITIFS DE PROTECTION AU DROIT DES APPUIS

La conception des protections contre les affouillements (berges et appuis d'ouvrages) de diverses natures, plus ou moins bien adaptées au contexte. Parmi les différentes techniques envisageables et les plus couramment employées, on peut citer :

- la réalisation de tapis d'enrochements autour des semelles de fondations ou au niveau des berges ;
- la constitution de batardeaux de protection autour des fondations : rideaux de palplanches ou micropieux jointifs scellés par du ciment et formant une barrière étanche ;
- des traitements de sol, par exemple par « jet-grouting » pour des sols constitués de galets ;
- la mise en place de structures additionnelles placées en amont des piles (ou pilots) visant à briser le courant incident et afin d'affaiblir le tourbillon générateur de l'érosion ;
- le bétonnage du fond de lit (radier béton) sur une ou plusieurs travées au droit de l'ouvrage ;
- au niveau des culées (notamment en saillie), la construction de digues ou murs guide-eau.

Les calculs de justification de ces protections devront s'appuyer sur une étude hydrogéologique approfondie et le recours à un géotechnicien spécialisé pour le dimensionnement détaillé des ouvrages. Dans le cadre d'un projet de renforcement, les mesures de protection préconisées devront ainsi être précisées par des documents comportant les notes de calculs les justifiant ainsi que les métrés et plans correspondants. Toute intervention en site aquatique doit bien sûr se faire dans le strict respect de la loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006 avec ses modifications ultérieures.

2.1.3 - MODIFICATION DES CONDITIONS HYDRAULIQUES ET PROTECTIONS À DISTANCE

Ce type d'intervention recouvre en particulier les techniques suivantes :

- création d'ouvrages de décharge visant à élargir le lit de la rivière afin de limiter les vitesses d'écoulement par percement des remblais d'accès (buses ou cadres) ;
- construction d'épis (en gabions ou enrochement) implantées en travers du lit pour gêner l'écoulement fluvial ou pour détourner le courant de sa trajectoire naturelle ;
- la mise en place de seuils ou perrés, en enrochements libres ou liés, en aval des appuis des ouvrages permettant, par la réduction locale de la pente et des vitesses d'écoulement, de stabiliser le profil en long dans le périmètre de l'ouvrage.

De tels aménagements doivent faire l'objet d'études soignées en accord bien sûr avec toutes les exigences réglementaires de respect de l'environnement.

2.2 - RECOMMANDATIONS VIS-À-VIS DU RISQUE « POUSSÉE DES EAUX »

Dans l'objectif de gérer le risque « poussée des eaux », il est conseillé aux gestionnaires concernés d'essayer d'agir sur :

- **l'aléa :**
 - en adoptant une politique d'élimination régulière des embâcles au droit des ponts (gestionnaire de la voie d'eau).
- **la vulnérabilité (gestionnaire des ouvrages) :**
 - en vérifiant la possibilité d'évacuation des eaux des tabliers de type caisson qui peuvent être ennoyés en cas de crue,
 - en lestant les ouvrages légers,
 - en s'assurant que le dispositif de drainage des remblais contigus des culées à mur de front en campagne est bien entretenu.

2.3 - RECOMMANDATIONS VIS-À-VIS DU RISQUE « CHOC DE BATEAU »

Le règlement général de police de la navigation intérieure (RGPN) et les règlements de police particuliers donnent des règles sur le stationnement, énoncent les dispositions générales à prendre en cas de crue ou de formation de glaces, les prescriptions de restriction ou d'interdiction de navigation en période de crue. Ce sujet est largement pris en compte par les gestionnaires comme VNF, les responsables de port fluviaux, qui diffusent des avis à la batellerie et donnent des conseils sur le bon amarrage des bateaux.

La sécurité des amarres est la responsabilité de chaque propriétaire ou conducteur.

Dans l'objectif de gérer le risque « choc de bateaux », il est conseillé d'essayer d'agir sur :

- **l'aléa (police de la navigation intérieure) :**
 - en adoptant une politique de vérification des amarres des bateaux à quai, dès l'annonce de crues exceptionnelles. Les amarres à vérifier en priorité sont celles des bateaux situés en amont des ponts « anciens » à tablier métallique.
- **la vulnérabilité (gestionnaire d'ouvrage) :**
 - en prévoyant la mise en place de protections de type Duc d'Albe autour des piles des ponts enjambant des cours d'eau à fort trafic fluvial de marchandises,
 - il n'est pas possible en revanche d'agir sur la vulnérabilité des ouvrages à un choc sur leur tablier.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Sétra. *Maîtrise des risques – Application aux ouvrages d’art*, guide technique. 2013
- [2] Cerema. *Analyse des risques des ouvrages en remblai renforcé relevant de la technologie « Terre Armée »*, guide méthodologique. 2014
- [3] Sétra. *Cours d’eau et ponts*, guide technique. 2007
- [4] Cerema. *Analyse de risque des ponts en site affouillable*, guide méthodologique. 2019
- [5] NF P94-056 – *Sols : reconnaissance et essais – Analyse granulométrique – Méthode par tamisage à sec après lavage*, mars 1996
- [6] E.V. Richardson and S.R. Davis – *Evaluating scour at bridge – fourth edition of HEC-18*, Technical Report FHWA-NHI-01-001, mai 2001
- [7] L.A. Arneson, L.W. Zevenbergen, P.F. Lagasse and P.E. Clopper – *Evaluating scour at bridge – fifth edition of HEC-18*, Technical Report FHWA-HIF-12-003, avril 2012
- [8] NF P94-262 – *Justification des ouvrages géotechniques – Normes d’application nationale de l’Eurocode 7 – Fondations profondes*, juillet 2012
- [9] NF EN 1991-1-6 – *Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-6 : actions générales – Actions en cours d’exécution*, novembre 2005
- [10] Cahier des clauses techniques générales – Fascicule 61 – Titre II – Conception, calcul et épreuves des ouvrages d’art – Programme de charges et épreuves des ponts-routes, 1971
- [11] Shinohana et al. – *Vibration Measurement of Railway Bridge Substructures Using Compact Oscillator and Optical Fiber Sensors* – Journal of Japan Society of Civil Engineers, A1, Vol. 69, No. 1, pp. 40-56, 2013
- [12] Règlements particuliers de police
(https://www.vnf.fr/vnf/publicationss/rpp_2_-_seine-yonne_-_version_officielle_2019_20190820185148/)

Annexes

Annexe 1 - Construction d'une base de données	88
Annexe 2 - Détermination de la masse des ouvrages en fonction de leur typologie	91

ANNEXE 1

Construction d'une base de données

L'application de la démarche développée dans le cadre du présent guide sur un patrimoine d'ouvrages requiert la constitution d'une base de données contenant les informations techniques disponibles collectées pour chaque ouvrage (dont certaines sont éventuellement approximées) et qui constitue le recueil minimal des informations techniques nécessaires à l'étude.

Ces caractéristiques relatives aux ouvrages du périmètre d'étude sont recensées à partir d'éléments à disposition tels que :

- la base de données LAGORA ;
- la base de données VNF ;
- les données transmises par le gestionnaire ;
- la base de données sur les crues ;
- les rapports d'inspection d'ouvrages ;
- les données d'archives Cerema ;
- les cartes géologiques.

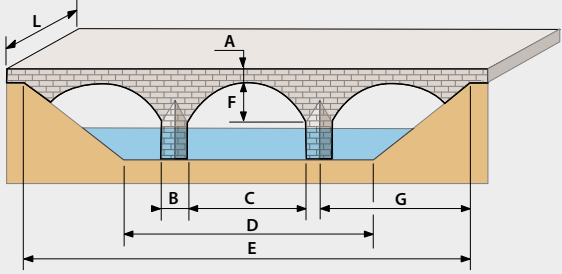
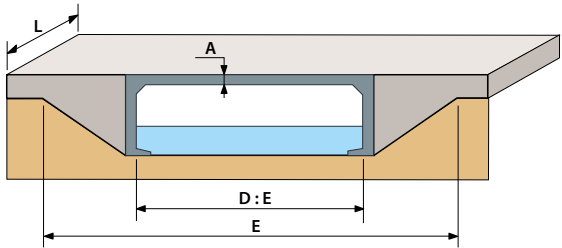
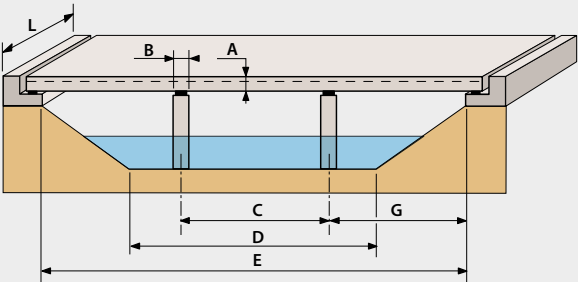
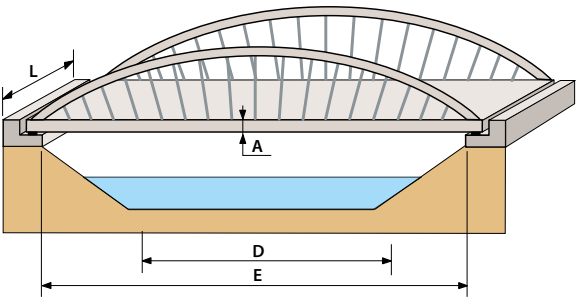
Chaque ouvrage référencé dans la base est généralement identifié par un numéro suivi de l'appellation de l'ouvrage au sens des Règlements particuliers de police publiés par Voies navigables de France (VNF) [12]. Les coordonnées (latitude et longitude) de chaque ouvrage sont issues du site institutionnel geoportail.fr. Ces coordonnées sont relevées au plus près de l'axe et au centre de l'ouvrage. Le système de projection est de type « WGC84 ». Ce repérage permet ainsi d'intégrer les éléments dans une application de type SIG, à condition que la base soit enregistrée au préalable sous un format de type « .CSV ».

Les points suivants fournissent des indications sur certaines caractéristiques recherchées :

- **Nom de la rivière franchie ;**
- **Typologie du tablier :**

21 types d'ouvrages sont proposés et détaillés dans le tableau 78. Les schémas présentés recensent les caractéristiques dimensionnelles nécessaires pour compléter la base par typologies d'ouvrages.

Tableau 78 : Typologie des ouvrages

Type d'ouvrage	Caractéristiques dimensionnelles nécessaires à l'analyse des risques
<ul style="list-style-type: none"> • Pont en maçonnerie • Pont en maçonnerie avec élargissement • Pont voûte en béton armé • Pont voûte en béton armé élargi 	
<ul style="list-style-type: none"> • Pont cadre, portique BA (béton armé) <p>(Les côtes sont à déterminer en fonction de l'ouvrage rencontré. D ou E peuvent être dans certains cas identiques)</p>	
<ul style="list-style-type: none"> • Pont dalle ou dalle nervurée en béton armé • Pont dalle ou dalle nervurée en béton précontraint • Pont à poutres sous chaussée en béton armé • Pont à poutres précontraintes par adhérence (PRAD) • Pont à poutres précontraintes par post-tension (VIPP) • Pont à poutrelles enrobées • Pont mixte acier-béton à poutres sous chaussée avec dalle BA (béton armé) • Pont mixte acier-béton caisson avec dalle BA (béton armé) • Pont mixte acier-béton caisson avec dalle orthotrope • Pont à poutres latérales treillis • Pont à poutre caisson en béton précontraint • Autre <p>(L'épaisseur à retenir pour les analyses de risques sur ces types d'ouvrages sera l'épaisseur moyenne A)</p>	
<ul style="list-style-type: none"> • Bowstring BA (béton armé) ou BP (béton précontraint) • Bowstring métal • Pont à haubans ou suspendu 	

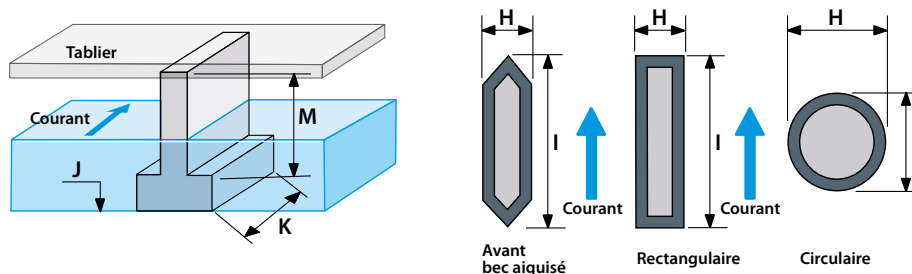
La légende affecte des indices en fonction des cotes recherchées. Ces indices sont repris en en-tête des colonnes concernées dans la base.

- A** - épaisseur moyenne du tablier ou à la clé pour les ponts en maçonnerie
- B** - épaisseur de piles
- C** - entraxe piles ou ouverture pour les ponts en maçonnerie
- D** - largeur du fond du lit mineur
- E** - largeur maximale du lit mineur
- F** - hauteur clé de voûte
- G** - portée de la travée adjacente à la portée maximale
- H** - épaisseur de piles perpendiculaires au courant
- I** - largeur de piles parallèles au courant
- J** - cote sous face semelle de pile
- K** - longueur de fondation
- L** - largeur de tablier
- M** - hauteur de pile de la semelle au tablier
- N** - hauteur de culée
- O** - cote base de semelle

• **Pile en rivière :**

Lorsqu'il y a présence de piles en rivière, trois formes différentes de piles sont retenues : avec avant-bec aiguisé, rectangulaire ou cylindrique (cf. figure 30). La présence ou non de protection de piles est également mentionnée et les matériaux retenus sont soit le béton, soit la maçonnerie.

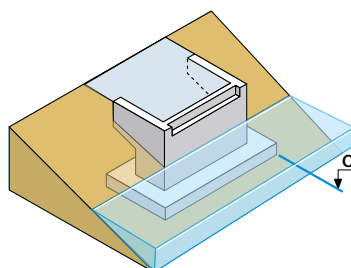
Figure 30 : Formes des piles retenues



• **Type de culées :**

Deux types de culées sont retenus : les culées à mur de front (cf. figure 31) directement en contact avec la rivière et les autres.

Figure 31 : Culée à mur de front



La présence de butées ou d'encastremets est relevée, ainsi que la présence d'un dispositif de drainage.

La présence ou l'absence d'une culée en saillie sur le cours d'eau doit également être mentionnée au travers d'un champ dédié.

ANNEXE 2

Détermination de la masse des ouvrages en fonction de leur typologie

La masse des ouvrages, nécessaire aux vérifications des fondations pour l'évaluation de leur vulnérabilité vis-à-vis de la poussée des eaux ou des chocs, est déterminée à partir de ratios de pré-dimensionnement ou de règle de 3 sur des ouvrages de typologie similaire. Les masses utilisées peuvent donc présenter des écarts avec les masses réelles des ouvrages, qui nous sont difficilement accessibles dans le cadre d'une analyse simplifiée. Ces écarts peuvent cependant être considérés comme admissibles. À noter que l'on ne considère dans notre analyse que la masse des tabliers (la masse des appuis est négligée).

On note L la longueur des ouvrages et l leur largeur.

■ PONT CADRE (BA) et PORTIQUE (BA) :

La masse linéique de ces types d'ouvrage est obtenue en considérant le poids de leur traverse et des superstructures sur l'ouvrage.

Pour la traverse, on considère une épaisseur égale à $(L/40+0,1)$ m. La masse linéique de la traverse est donc égale à $[(L/40+0,1) \times l \times 2,5]$ t/ml.

Pour le poids des superstructures, on considère uniquement une épaisseur de 11 cm de complexe étanchéité – couche de roulement, de masse linéique égale à $(0,11 \times 2,4 \times l)$ t/ml.

■ BUSES EN BÉTON :

Ces ouvrages ne présentant pas de piles, il n'est pas utile d'en estimer la masse.

■ PONT DALLE OU DALLE NERVURÉE EN BÉTON ARMÉ :

La masse linéique de ce type d'ouvrage est obtenue en considérant le poids de la dalle et des superstructures sur l'ouvrage.

Pour la dalle, on considère son épaisseur moyenne égale à $(L/20)$ m. La masse linéique de la traverse est donc égale à $[L/20 \times l \times 2,5]$ t/ml.

Pour le poids des superstructures, on considère uniquement une épaisseur de 11 cm de complexe étanchéité – couche de roulement, de masse linéique égale à $(0,11 \times 2,4 \times l)$ t/ml.

■ PONT DALLE OU DALLE NERVURÉE EN BÉTON PRÉCONTRAIT :

La masse linéique de ce type d'ouvrage est obtenue en considérant le poids de la dalle et des superstructures sur l'ouvrage.

Pour la dalle, on considère une épaisseur moyenne égale à $(L/22)$ m. La masse linéique de la traverse est donc égale à $[L/22 \times l \times 2,5]$ t/ml.

Pour le poids des superstructures, on considère uniquement une épaisseur de 11 cm de complexe étanchéité – couche de roulement, de masse linéique égale à $(0,11 \times 2,4 \times l)$ t/ml.

■ PONT À POUTRES SOUS CHAUSSÉE EN BÉTON ARMÉ :

La masse linéique de ce type d'ouvrage est obtenue en considérant une masse moyenne du tablier et la masse des superstructures sur l'ouvrage.

Pour le tablier, le dossier pilote PSIBA77 ne donne pas de ratio directement utilisable. Il développe cependant deux exemples d'ouvrages, l'un de 17 m de longueur de masse linéique 1 t/m^2 et l'autre de longueur 26 m et de masse linéique $1,3 \text{ t/m}^2$. La masse du tablier peut donc être calculée en considérant la formule $[(1+(L-17) \times 0,033) \times l]$ (en t/ml).

Pour le poids des superstructures, on considère uniquement une épaisseur de 11 cm de complexe étanchéité – couche de roulement, de masse linéique égale à $(0,11 \times 2,4 \times l) \text{ t/ml}$.

■ PONT À POUTRES PRÉCONTRAINTES PAR ADHÉRENCE (PRAD) :

La masse linéique de ce type d'ouvrage est obtenue en considérant une masse moyenne du tablier et la masse des superstructures sur l'ouvrage.

Pour le tablier, son élancement est généralement de $1/18L$. Si l'on considère que le hourdis est d'épaisseur 20 cm, la hauteur des poutres est donc de $(1/18L-0,2)$. On peut estimer la somme des largeurs des poutres comme égale à environ $1/4 \times l$ (les poutres d'ouvrage PRAD sont relativement proches les unes des autres, mais leur âme est fine). La masse des tabliers de PRAD est donc assimilable à $[(1/18L-0,2) \times 1/4l + 0,2l] \times 2,5$ (en t/ml).

Pour le poids des superstructures, on considère seulement une épaisseur de 11 cm de complexe étanchéité – couche de roulement, de masse linéique égale à $(0,11 \times 2,4 \times l) \text{ t/ml}$.

■ PONT À POUTRES PRÉCONTRAINTES PAR POST-TENSION (VIPP) :

La masse linéique de ce type d'ouvrage est obtenue en considérant une masse moyenne du tablier et la masse des superstructures sur l'ouvrage.

Pour le tablier, il n'existe pas de ratio de pré-dimensionnement permettant de déterminer un poids a priori de ce type d'ouvrage. On peut estimer que la masse surfacique des VIPP est proche de $1,1 \text{ t/m}^2$ (cette masse surfacique est celle de l'ouvrage développé en exemple dans le guide d'évaluation structurale des VIPP en cours de rédaction par le Cerema). La masse linéique des tabliers de VIPP est donc calculée par : $1,1 \times l$ (en t/ml).

Pour le poids des superstructures, on considère uniquement une épaisseur de 11 cm de complexe étanchéité – couche de roulement, de masse linéique égale à $(0,11 \times 2,4 \times l) \text{ t/ml}$.

■ PONT À POUTRELLES ENROBÉES :

La masse linéique de ce type d'ouvrage est obtenue en considérant une masse moyenne du tablier et la masse des superstructures sur l'ouvrage.

Pour le tablier, son élancement est généralement de $(L/33+0,1)$. Ce tablier a une masse volumique supérieure à celle du béton ($2,5 \text{ t/m}^3$), du fait de la présence des poutrelles en acier. Pour tenir compte de cette masse volumique majorée, on applique un coefficient de majoration de 1,1. La masse linéique du tablier est donc prise égale à $[(L/33+0,1) \times l \times 2,5 \times 1,1]$ (en t/ml).

Pour le poids des superstructures, on considère uniquement une épaisseur de 11 cm de complexe étanchéité – couche de roulement, de masse linéique égale à $(0,11 \times 2,4 \times l) \text{ t/ml}$.

■ PONT MIXTE ACIER-BÉTON À POUTRES SOUS CHAUSSÉE AVEC DALLE BA et PONT MIXTE ACIER-BÉTON CAISSON AVEC DALLE BA :

La masse linéique de ces types d'ouvrage est obtenue en considérant une masse moyenne du tablier et la masse des superstructures sur l'ouvrage.

Le guide de conception durable des ponts bipoutres mixte acier/béton du Cerema propose une formule permettant d'estimer a priori la masse d'une charpente métallique pour un pont bipoutre mixte. Cette formule assimile la masse de la charpente à $(65+0,9L^{1,2} \cdot (1,43-l/30)+2l+0,22L) \cdot l/1000$ (en t/ml). À cette masse il faut ajouter celle de la dalle, que l'on peut prendre égale à $0,3l \times 2,5$ (en t/ml).

Pour le poids des superstructures, on considère seulement une épaisseur de 11 cm de complexe étanchéité – couche de roulement, de masse linéique égale à $(0,11 \times 2,4 \times l)$ t/ml.

■ PONT ACIER À POUTRES SOUS CHAUSSÉE AVEC DALLE ORTHOTROPE et PONT ACIER CAISSON AVEC DALLE ORTHOTROPE :

La masse linéique de ces types d'ouvrage est obtenue en considérant une masse moyenne du tablier et la masse des superstructures sur l'ouvrage.

Le BT5 donne une formule pour évaluer a priori la masse de ces ouvrages. Cette formule assimile cette masse à $(40\sqrt{1,4L} - 100)l$ (en t/ml) pour les ouvrages isostatiques et à $(40\sqrt{L} - 100)l$ (en t/ml) pour les ouvrages hyperstatiques.

Pour le poids des superstructures, on considère uniquement une épaisseur de 11 cm de complexe étanchéité – couche de roulement, de masse linéique égale à $(0,11 \times 2,4 \times l)$ t/ml.

■ PONT À POUTRES LATÉRALES TREILLIS :

Il n'existe pas de ratio de pré-dimensionnement permettant de déterminer un poids a priori de ce type d'ouvrage. Sur un ouvrage de cette typologie de 106 m de longueur pour 11 m de largeur, nous avons constaté une masse de 610 t (superstructures comprises). Avec une règle de 3, nous calculerons donc la masse de ce type d'ouvrage comme étant égale à $0,53.l$ (en t/ml).

■ BOWSTRING BA OU BP :

Il n'existe pas de ratio de pré-dimensionnement permettant de déterminer un poids a priori de ce type d'ouvrage. Sur un ouvrage de cette typologie de 37 m de longueur pour 14 m de largeur, nous avons constaté une masse de 900 t (superstructures comprises). Avec une règle de 3, nous calculerons donc la masse de ce type d'ouvrage comme étant égale à $1,73.l$ (en t/ml).

■ BOWSTRING MÉTAL :

Il n'existe pas de ratio de pré-dimensionnement permettant de déterminer un poids a priori de ce type d'ouvrage. Sur un ouvrage de cette typologie de 180 m de longueur pour 21 m de largeur, nous avons constaté une masse de 3 700 t (superstructures comprises). Avec une règle de 3, nous calculerons donc la masse de ce type d'ouvrage comme étant égale à $0,98.l$ (en t/ml).

■ PONT CAISSON EN BÉTON PRÉCONTRAIT :

La masse linéique de ces types d'ouvrage est obtenue en considérant une masse moyenne du tablier et la masse des superstructures sur l'ouvrage.

Un ratio généralement admis consiste à calculer l'épaisseur moyenne d'un caisson précontraint à l'aide de la formule $e = (0,4+0,0035L)$. On peut donc assimiler le poids des tabliers de ces ouvrages à $[(0,4+0,0035L) \times l \times 2,5]$ (en t/ml).

Pour le poids des superstructures, on considère uniquement une épaisseur de 11 cm de complexe étanchéité – couche de roulement, de masse linéique égale à $(0,11 \times 2,4 \times l)$ t/ml.

■ **PONT À HAUBANS OU SUSPENDU :**

Il n'existe pas de ratio de pré-dimensionnement permettant de déterminer un poids a priori de ce type d'ouvrage. Sur un ouvrage de cette typologie de 2 460 m de longueur pour 32 m de largeur, nous avons constaté une masse de 36 000 t (superstructures comprises). Avec une règle de 3, nous calculerons donc la masse de ce type d'ouvrage comme étant égale à $0,46.l$ (en t/ml).

■ **PONT MÉTALLIQUE EN ARC :**

Il n'existe pas de ratio de pré-dimensionnement permettant de déterminer un poids a priori de ce type d'ouvrage. Nous proposons la règle suivante : $[(0,3 \times l \times 2,5) + l/2 \times 0,2]$ (en t/ml) – on considère une dalle en béton de 30 cm d'épaisseur et des arcs espacés transversalement de 2 m avec une masse linéique unitaire de 0,2 t/ml.

■ **AUTRE :**

Cette catégorie est trop hétérogène et comporte des ouvrages trop particuliers pour qu'il soit possible de donner une règle simple donnant une masse a priori des ouvrages de cette typologie.

■ **PONT VOÛTE EN MAÇONNERIE OU BÉTON ARMÉ, ÉLARGI OU NON :**

Pour calculer le poids des ouvrages en maçonnerie, il est nécessaire de connaître la forme de leur voûte. Dans notre analyse, nous proposons de distinguer trois formes de voûte en fonction du rapport σ de leur flèche et de leur ouverture ($\sigma = f/2a$, où $2a$ est l'ouverture de la voûte). On considère que l'épaisseur de la voûte à la clé vaut $e_0 = 0,2 \cdot \sqrt{2a}$ (formule de Dupuis [14]).

- Pour un rapport $\sigma = 1/2$ (voûte plein cintre), la masse linéique en t/ml de la voûte est prise égale à $M_v \cdot l \cdot [0,5 + L/2 \cdot (1 - \frac{\pi}{4}) + 0,2\sqrt{L}]$;
- Pour un rapport $1/2 < \sigma < 1/7$ (voûte surbaissée), on considère un surbaissement moyen $\sigma = 1/4$, la masse linéique en t/ml de la voûte est prise égale à $M_v \cdot l \cdot [0,5 + L/12 + 0,2\sqrt{L}]$;
- Pour un rapport $1/7 < \sigma$ (voûte très surbaissée), on considère un surbaissement moyen $\sigma = 1/7$, la masse linéique en t/ml de la voûte est prise égale à $M_v \cdot l \cdot [0,5 + L/21 + 0,2\sqrt{L}]$.

Dans les expressions précédentes, M_v est la masse volumique du matériau : $M_v = 2,2 \text{ t/m}^3$ pour de la maçonnerie et $M_v = 2,5 \text{ t/m}^3$ pour du béton.

TRADUCTION

Methodology Guide Risk analysis of bridges in flood situations

Major river flooding is a hazard whose frequency and intensity tend to increase with the effects of climate change. The management of these floods is a concern both for risk management stakeholders and for the owners and operators of the bridges crossing these rivers.

The resisting capacities of bridges depend on their design: the nature of the materials used, the type of foundation, the structure of the deck, etc. Given the associated human and economical risks, it is essential to evaluate the capacity of bridges to resist the different hazards they are exposed to in flood situations. This guide is a declination on the general risk analysis approach developed by Cerema. It proposes a pragmatic and effective method for identifying and classifying the most sensitive bridges exposed to these hazards.

Guía metodológica Análisis de riesgos de los puentes en caso de crecida

Las grandes crecidas de los ríos constituyen un peligro cuya frecuencia e intensidad tienden a aumentar a raíz de los efectos del cambio climático. La gestión de dichas inundaciones preocupa tanto a los responsables de la gestión de riesgos como a los gestores de los puentes por las que pasan esos cursos de agua.

La capacidad de resistencia de los puentes depende de su diseño: la clase de materiales utilizados, el tipo de fundamentos, la estructura del tablero, etc. Habida cuenta de los riesgos que entrañan para la seguridad de la población y la economía, analizar la resistencia de los puentes ante las agresiones en periodo de crecidas se perfila como algo imprescindible. Esta guía presenta el programa general de análisis de riesgos desarrollado por el Cerema. Ofrece un método pragmático y eficaz para inventariar y clasificar los puentes más sensibles y expuestas a este peligro.

© 2023 - Cerema

LE CEREMA, L'EXPERTISE PUBLIQUE POUR LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET LA COHÉSION DES TERRITOIRES

Le Cerema, Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement, est un établissement public qui apporte son concours à l'État et aux collectivités territoriales pour l'élaboration, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques publiques au service de la transition écologique, de l'adaptation au changement climatique et de la cohésion des territoires. Il porte des missions de recherche & innovation et appuie le transfert d'innovations dans les territoires et auprès des acteurs privés.

Le Cerema agit dans 6 domaines d'activité : Expertise & Ingénierie territoriale, Bâtiment, Mobilités, Infrastructures de transport, Environnement & Risques, Mer & Littoral. Présent partout en métropole et dans les Outre-mer par ses 26 implantations, il développe une expertise de référence au contact de ses partenaires européens et contribue à diffuser le savoir-faire français à l'international.

Le Cerema capitalise les connaissances et savoir-faire dans ses domaines d'activité. Éditeur, il mène sa mission de centre de ressources en ingénierie par la mise à disposition de près de 3 000 références à retrouver sur www.cerema.fr rubrique nos publications.

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du Cerema est illicite (article L.122-4 du Code de la propriété intellectuelle). Cette reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles L.335-2 et L.335-3 du CPI.

Cet ouvrage a été imprimé sur du papier issu de forêts gérées durablement (norme PEFC) et fabriqué proprement (norme ECF). L'imprimerie Dupliprint est une installation classée pour la protection de l'environnement et respecte les directives européennes en vigueur relatives à l'utilisation d'encre végétales, le recyclage des rognures de papier, le traitement des déchets dangereux par des filières agréées et la réduction des émissions de COV.

Coordination : Direction de la Stratégie et de la Communication / Pôle éditions

Conception de la maquette graphique : Farénis

Mise en page : laurentmathieu.fr

Impression : Dupliprint, 733 rue Saint-Léonard 53100 Mayenne

Achévé d'imprimer : octobre 2023

Dépôt légal : octobre 2023

ISBN : 978-2-37180-619-1 (pdf) - 978-2-37180-620-7 (papier) - ISSN : 2276-0164

Éditions du Cerema

Cité des mobilités

25, avenue François Mitterrand CS 92803 - 69674 Bron Cedex - France

www.cerema.fr

ANALYSE DES RISQUES DES PONTS EN SITUATION DE CRUE

Les crues majeures des rivières constituent un aléa dont la fréquence et l'intensité ont tendance à augmenter avec les effets du changement climatique.

La gestion de ces inondations est une préoccupation tant pour les acteurs de la gestion des risques que pour les gestionnaires des ouvrages d'art qui franchissent ces cours d'eau.

Les capacités de résistance des ouvrages dépendent de leur conception : la nature des matériaux utilisés, le type de fondation, la structure du tablier, etc. Compte tenu des risques pour la sécurité des populations et pour l'économie, analyser la résistance des ponts face aux agressions en période de crues apparaît essentiel. Ce guide constitue une déclinaison de la démarche générale d'analyse des risques développée par le Cerema. Il propose une méthode pragmatique et efficace de recensement et de classement des ouvrages les plus sensibles et exposés à cet aléa.



EXPERTISE & INGÉNIERIE TERRITORIALE | BÂTIMENT | MOBILITÉS
| **INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT** | ENVIRONNEMENT &
RISQUES | MER & LITTORAL

