

Caractérisation des maçonneries dans les barrages poids

Characterization of masonry in the gravity dams

Olivier Lapeyre

ISL Ingénierie, 29 rue Maurice Flandin, 69003 Lyon
lapeyre@isl.fr

Marc-Henri Prost

ISL Ingénierie, 65 avenue Clément Ader, 34170 Castelnau le Lez
prost@isl.fr

MOTS CLÉS

Reconnaisances, caractéristiques des matériaux, vieillissement, cohésion, angle de frottement, densité, calculs de stabilité.

RÉSUMÉ

Caractérisation des maçonneries dans les barrages poids.

De nombreux types d'essais, de mesures, de reconnaissances ou d'approches existent pour quantifier et qualifier les caractéristiques de la maçonnerie (densité, angle de frottement et cohésion). Néanmoins leur détermination pour la réalisation des études de stabilité est rendue complexe du fait du manque, en règle générale, de représentativité des valeurs obtenues sur des échantillons de petites dimensions en comparaison de l'ouvrage étudié. En tout état de cause, le choix des paramètres ne peut se faire qu'à dire d'expert.

Cet article présente les différentes méthodes d'obtention des caractéristiques et vise à proposer des règles pour obtenir à la fois des valeurs relativement sécuritaires, tout en étant proche de la situation rencontrée.

Notamment :

- Le poids volumique retenu pour les calculs de stabilité est le poids volumique humide (pour la partie au-dessus du niveau normal d'eau dans le barrage) associé au poids volumique saturé sous la ligne de saturation. La détermination de ce poids volumique nécessite quelques précautions.*
- Il est apparu utile d'intégrer une combinaison extrême supplémentaire afin de vérifier la stabilité de l'ouvrage en considérant un vieillissement « enveloppe » de la maçonnerie.*
- L'angle de frottement et la cohésion retenus pour les calculs de stabilité sont les valeurs de pic, que l'on peut approcher par diverses méthodes à croiser : essais de traction et de compression, approches de type Hoek&Brown et/ou Barton.*
- Il est apparu utile d'intégrer une combinaison extrême supplémentaire afin de vérifier la stabilité de l'ouvrage en considérant les caractéristiques résiduelles de la maçonnerie.*

ABSTRACT

Characterization of masonry in the gravity dams.

A lot of means are available to access the main mechanical characteristics of masonry (density, cohesion, friction angle) but it remains difficult to provide reliable parameters for stability analyses: values are often the result of test practiced on small parts of the dam, not representative of the whole structure.

As a consequence, choice of parameters is often done by the expert.

This article aims to be an inventory of the available methods, and propose a guideline to help designers in their choice of conservative enough values but nevertheless actual.

Particularly :

- Density proposed for stability analyses is wet density (in the off water part of the dam) coupled at the saturated density under normal water level in the dam.*
- An additional extreme combination is used to check the dam stability with an aging of the masonry (reduced density)*
- Friction angle and cohesion proposed for stability analyses are the peak values (obtained by simple compression and tensile tests and Hoek&Brown or Barton's methods).*
- An other additional extreme combination is used to check the dam stability with residual characteristics of the masonry.*

1. INTRODUCTION

Outre les conditions du site, le calcul de stabilité d'un barrage poids en maçonnerie repose sur la définition des matériaux le caractérisant ainsi que ceux de sa fondation (y compris son interface).

Bien que nécessitant une expertise à chaque fois spécifique, la définition des caractéristiques intrinsèques des matériaux de fondation reste, en général, maîtrisée du fait :

- de méthodologies éprouvées pour caractériser le matériau homogénéisé (Hoek&Brown par exemple) ou les joints rocheux (Barton par exemple),
- d'un matériau dont l'évolution par « vieillissement » est très limitée ; sauf cas particuliers (dissolution des gypses, rupture progressive des argiles sur-consolidées, ...),

La détermination des caractéristiques du corps du barrage est plus complexe du fait :

- d'un matériau hétérogène (alternance de pierres et de mortier avec des proportions variables dans sa masse),
- d'un possible vieillissement difficile à quantifier : perte de liant, voire dégradation de la pierre dans les zones les plus sollicitées.

La présente communication vise à détailler, sur la base de plusieurs exemples de barrage, la complexité de la définition de ces caractéristiques, les reconnaissances pouvant être réalisées pour y parvenir et l'analyse de leur vieillissement. Elle s'inscrit dans la continuité des travaux sur ce sujet menés en 1993 [1] et 2003 [2].

Elle vise en conclusion à proposer quelques ajustements des recommandations du CFBR (Comité Français des Barrages et Réservoirs) utilisées pour le calcul des barrages poids [3].

2. PRESENTATION DES BARRAGES

Plusieurs barrages en maçonnerie ont récemment fait l'objet d'une révision spéciale ou d'un diagnostic approfondi, aboutissant à leur confortement. A ces expériences récentes s'ajoutent des études de dangers (avec réalisation d'études de stabilité) ou des études de confortement plus anciennes traitant des sujets abordés par la présente communication.

Les barrages sur lesquels s'appuie la présente communication sont présentés dans le tableau 1 ci-dessous :

Barrage :	Type :	Année de construction :	Hauteur au dessus du TN :	Classe :	Volume de la retenue actuel :	Maçonnerie :	Fondation :	Etudes en cours :
Chartrain	Poids arqué en maçonnerie	Entre 1888 et 1891	47 m	A	3,53 millions m ³	Moellons de granite liés avec du mortier de chaux	granite à deux micas	Etude de dangers
Chazilly	Poids maçonnés avec contreforts	Entre 1830 et 1837	22,5 m	A	2,2 millions m ³	Moellons de grès liés avec du mortier de chaux	Hétérogénéité de fondation : marnes à grès (fondation médiocre)	Révision spéciale
Lampy	Poids maçonnés avec contreforts	Entre 1778 et 1782	18 m	A	1,5 millions de m ³	Moellons de granite liés avec du mortier de chaux	granodiorites, granites et granites décomposés et arènes granitiques	Révision spéciale

Barrage :	Type :	Année de construction :	Hauteur au dessus du TN :	Classe :	Volume de la retenue actuel :	Maçonnerie :	Fondation :	Etudes en cours :
Montaigut	Poids maçonnés	Entre 1919 et 1920	20,5 m	A	270 000 m ³	Moellons de granite principalement liés au mortier de chaux	Gneiss sain à biotite et sillimanite	Diagnostic approfondi
Pont-et-Massène	Poids maçonnés avec contreforts	Entre 1878 et 1882	20 m	A	5,25 millions m ³	Moellons de granulite liés avec du mortier de chaux hydraulique	granulite purgée du rocher altéré	Révision spéciale
Settons	Poids maçonnés (avec masque Maurice Levy)	Entre 1855 et 1858	19 m	B	22,7 millions m ³	Moellons de granite liés avec du mortier de chaux	Granite fracturé (localement très altéré : gouttières à altérites)	Etude de dangers
Gouffre d'enfer	Poids maçonnés	1862 à 1866	57 m	A	1,08 millions m ³	Moellons de granit et mortier de chaux	Gneiss et granit	Etude de sûreté de fonctionnement
Pas du Riot	Poids maçonnés	1873 à 1878	36 m	A	0,95 millions m ³	Moellons de granit et mortier de chaux	Gneiss et granit	Etude de sûreté de fonctionnement

Tableau 1 : Description synoptique des barrages.

3. CARACTERISATION DE LA MAÇONNERIE

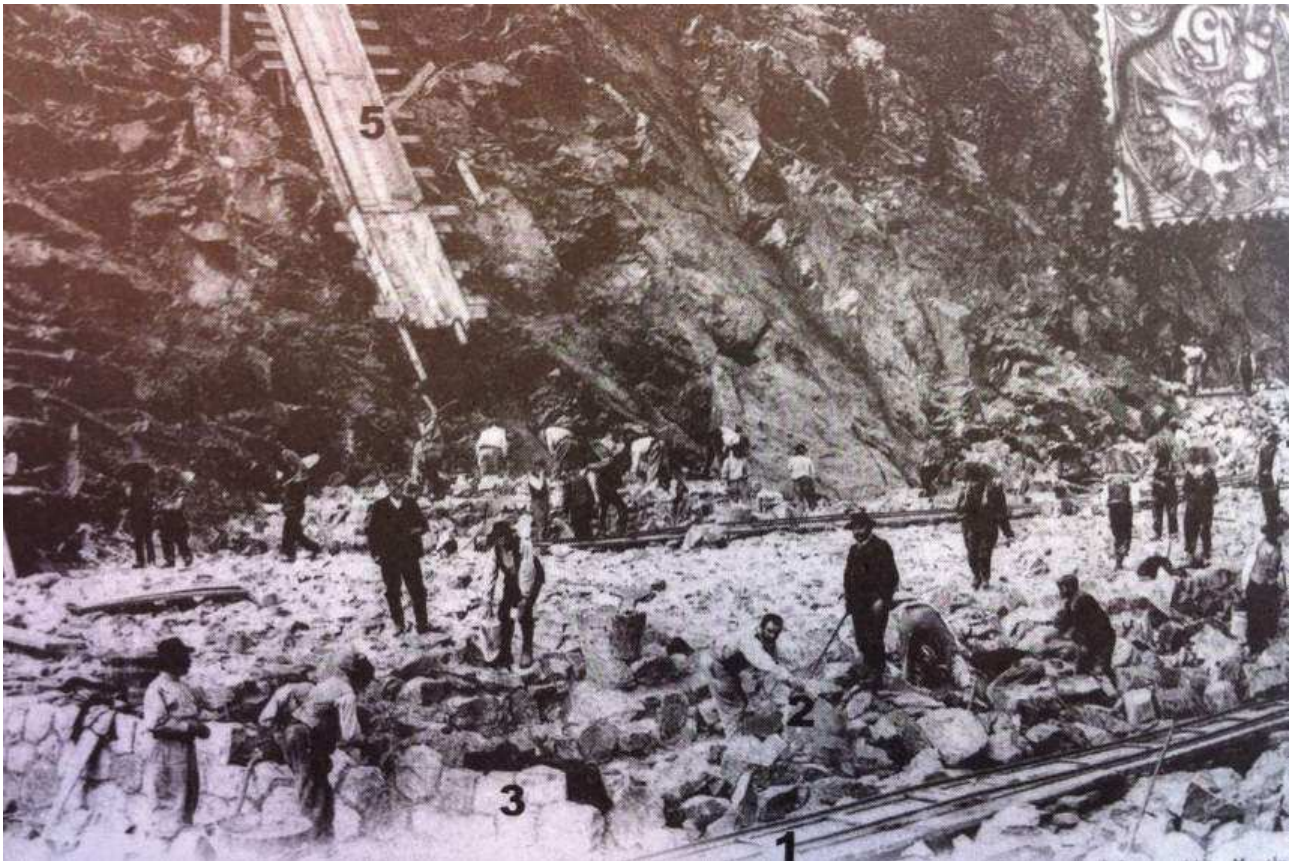
3.1 Etat général de la maçonnerie

3.1.1 Difficultés de caractérisation

L'état général de la maçonnerie des barrages est difficile à caractériser dans son ensemble. En effet, indépendamment du type de méthode utilisée, les investigations qui sont réalisées sont en règle générale locales (souvent dans des forages) et représentent difficilement les caractéristiques globales de l'ouvrage.

Des hétérogénéités existent notamment :

- Entre le corps du barrage et ses parements souvent de meilleure facture : le corps du barrage est souvent constitué d'un mélange de mortier et de pierres mises en vrac avec des proportions parfois importantes de mortier (40 à 50%) alors que les parements, parfois d'épaisseur importante, sont constitués principalement de pierres liées par du mortier (joints le plus souvent centimétriques).
- Dans le corps même du barrage : les techniques de réalisation de ces ouvrages ont pu évoluer pendant la construction (réalisation en plusieurs années) et les travaux étaient réalisés manuellement engendrant vraisemblablement des hétérogénéités de constitution selon les équipes de chantier présentes (proportions de chaux, de mortier, arrangement des blocs, choix des blocs, ...).
- Entre rives : il se peut, particulièrement pour des barrages de longueur importante (c'est notamment le cas du barrage de Chazilly de longueur 530 m environ), que les maçonneries aient été réalisées à des époques et/ou avec des méthodes différentes (pierres et/ou proportion de chaux différents). Le graphique 1 extrait de [5] illustre ces observations.



Graphique 1 : Exemple de construction d'un barrage en maçonnerie au début du XX^e siècle (barrage de Rochebut)

- Sur la hauteur de l'ouvrage : en l'absence de dispositif d'étanchéité avéré, la partie sommitale de l'ouvrage peut se dégrader plus rapidement dans le temps que le reste du barrage, sous l'effet de son exposition aux conditions climatiques (circulation d'eaux météoriques, gel / dégel, sels de deverglage). Les parties soumises au marnage et aux circulations d'eau de la retenue sont aussi potentiellement plus dégradées.

De plus, en fonction du type de maçonnerie et de l'agressivité de l'eau des retenues, leur sensibilité au vieillissement est plus ou moins prononcée. Notamment :

- Le ciment est un liant plus pérenne que la chaux hydraulique, utilisée dans la majeure partie des barrages maçonnés. En France, la proportion de barrage maçonné lié à la chaux hydraulique est de l'ordre de 70% [2].
- Différents qualités de chaux ont également été utilisées pour la réalisation de barrages maçonnés au cours du temps. La chaux du Teil (Ardèche) était par exemple régulièrement employée autour de 1900 (pour le barrage de Pont-et-Massène par exemple). Elle possède de bonnes caractéristiques : résistance à la traction supérieure à 1 MPa et résistance à la compression supérieure à 8 MPa. La chaux hydraulique de Corbigny de moins bonne qualité a par exemple été utilisée lors de la construction du barrage des Settons selon [5].

3.1.2 Méthodes générales

Compte-tenu des hétérogénéités des ouvrages, les méthodes d'appréciation de l'état général des maçonneries doivent permettre de récupérer des informations dans de nombreuses zones du barrage.

A ce titre, l'usage de méthodes destructives (sondages carottés ou destructifs avec pressiomètres) n'est pertinent que si les sondages sont suffisamment nombreux.

Ces méthodes sont largement employées car elles apportent une information de qualité, une observation directe des matériaux du corps de l'ouvrage (carottes et imagerie du forage) et permettent de réaliser de nombreux essais, tant in situ (détermination de la perméabilité, de la densité, des modules de déformation, de la résistivité, des vitesses d'ondes...) qu'en laboratoire (détermination des résistances à la compression et à la traction, essai de cisaillement, détermination de la teneur en eau, de la densité, détermination des propriétés du mortier ...). Elles permettent enfin un équipement des forages (piézomètre, inclinomètre...).

Les prospections géophysiques sont également utilisées afin d'obtenir une cartographie bidimensionnelle ou tridimensionnelle des résistivités et/ou des vitesses d'ondes sismiques dans l'ouvrage. Différentes techniques existent permettant soit de réaliser une analyse globale sur l'ouvrage (dans sa hauteur et sa longueur) soit locale (à l'échelle d'un forage horizontal ou vertical). Ces méthodes se heurtent parfois à des difficultés d'interprétation et nécessitent dans tous les cas l'emploi de corrélations avec les données issues de méthodes destructives.

3.1.3 Commentaires

La réalisation de sondages carottés est le choix prioritaire à retenir dans le cadre d'investigation dans la maçonnerie.

Leur coût relativement élevé peut toutefois être un frein à la réalisation de nombreux sondages.

La difficulté de ce type de sondage réside dans la réalisation et les moyens mis en œuvre pour obtenir des carottes intactes et représentatives du corps du barrage.

En effet, il est fréquent, de par la technique de forage, d'avoir des taux récupérations de carottes inférieurs à 100% et des carottes fracturées au niveau des joints entre la pierre et le mortier fournissant des RQD (Rock Quality Designation) parfois faibles rendant alors difficile leur interprétation (vide ? perte de la carotte ? maçonnerie fracturée ? joint ouvert ?).

La technique la plus couramment utilisée est la réalisation du forage à l'eau nécessitant une injection permanente d'eau à la base du forage avec des pressions parfois élevées (plusieurs dizaines de bars) afin de refroidir l'outil et de favoriser la remontée des cuttings (matériaux entre la paroi et le carottier).

Cette injection d'eau favorise le lessivage du mortier, notamment quand celui-ci est dans un état médiocre.

La difficulté résulte alors dans l'interprétation des résultats sur les carottes en distinguant les désordres dus au forage en lui-même (fracturation, lessivage principalement), des dégradations de la maçonnerie.

Une limitation des paramètres de forage peut être spécifiée afin de veiller à ne pas déstructurer la maçonnerie (exemple : limitation de la pression d'injection à la hauteur d'eau dans la retenue, limitation des cadences de forage à moins de 10 m/jour). De telles limitations ont été mises en œuvre avec succès sur les reconnaissances de Chazilly et de Pont-et-Massène réalisées en 2013. Des forages à l'air peuvent également être préconisés mais les entreprises répugnent en général à les exécuter (rendement trop faible, échauffement de l'outil).

On peut également noter que le forage à l'eau peut modifier la teneur en eau des maçonneries, spécialement celle des joints s'ils sont poreux et fausser ainsi les déterminations ultérieures des masses volumiques.

Le choix d'un carottier triple (permettant la récupération théorique d'échantillon intact) est à recommander afin de limiter la dégradation des carottes lors du forage et lors de leur extraction.

Enfin, il peut être intéressant de favoriser des forages de grand diamètre afin d'obtenir une représentativité plus intéressante des carottes, des parois, mais également des résultats d'essais. Le diamètre maximal de forage réalisable par la plupart des entreprises de géotechniques est environ 150 mm. Ce principe a récemment été appliqué lors des reconnaissances réalisées sur les barrages de Pont-et-Massène et de Chazilly où des forages carottés de diamètre 146 mm ont été réalisés.

L'imagerie optique ou acoustique (si les conditions de visibilité dans le forage ne permettent pas la réalisation d'une imagerie optique), utilisée également sur les 2 ouvrages cités ainsi que sur le barrage du Lampy, a permis de montrer une certaine corrélation avec l'observation des carottes.

Elle est également très utile pour déterminer si une forte fracturation et une récupération inférieure à 100% proviennent d'une dégradation consécutive au carottage ou correspondent à l'état réel des maçonneries in situ.

Enfin, au regard du coût de l'intervention il paraît intéressant de systématiser ces investigations (inférieur à 2 000 €/forage) plutôt qu'un passage traditionnel de la caméra moins précis.



Graphique 2 : Résultats d'imagerie optique :
à gauche maçonnerie en bon état, à droite maçonnerie avec vides (barrage de Chazilly)

Les prospections géophysiques permettent de cartographier des hétérogénéités dans la masse et peuvent être un outil d'aide à l'implantation des sondages géotechniques et/ou des prospections géophysiques locales si elles sont réalisées préalablement (cylindre électrique, diagraphie gamma gamma, cross hole...).

L'interprétation de ces prospections peut toutefois s'avérer délicate, et le rapport entre les informations recueillies et l'investissement consenti peut être faible. A titre d'illustration on citera les investigations qui ont été réalisées notamment sur les barrages de Pont-et-Massène (prospections électriques), de Chazilly (prospections électriques) et du Lampy (prospections sismiques).

Sur les deux premiers ouvrages, elles ont permis d'affiner l'implantation des sondages (au droit des fortes hétérogénéités de résistivité). Au barrage du Lampy, les résultats obtenus n'ont pu être validés par les sondages destructifs (discordance totale sur certaines zones) et l'apport de ces méthodes a été jugé décevant.

Les analyses physico chimiques du mortier permettent d'apprécier la constitution du mortier et d'évaluer l'éventuel vieillissement des maçonneries. Un étalonnage est nécessaire sur une maçonnerie jugée saine. Bien que relativement onéreuses (entre 2 000 et 3 000 €/échantillon) ces analyses pourraient s'avérer utiles. Elles ont été mises en œuvre sur les barrages de Chazilly et Pont-et-Massène. Les résultats fournis ont permis de déterminer la composition du mortier notamment le dosage du liant. Toutefois ces dosages restent difficiles à interpréter (difficulté de différenciation de l'origine de la calcite observée : incuits de la chaux, chaux carbonatée et charge sableuse calcaire) ; par ailleurs, le prix ne permet d'analyser que quelques échantillons, dont il est difficile d'apprécier la représentativité.

3.2 Détermination de la masse volumique

3.2.1 Difficultés

Plusieurs difficultés sont rencontrées lorsque l'on souhaite déterminer la masse volumique d'un ouvrage en maçonnerie : l'implantation du sondage carotté, la représentativité de l'échantillon à tester, le choix de la masse volumique utilisée (saturée, humide ?).

Afin de pouvoir avoir une idée générale de la consistance de la maçonnerie les reconnaissances géophysiques (tomographie électrique, sismique,...) sont de plus en plus utilisées avant la réalisation des reconnaissances géotechniques. Elles permettent d'orienter l'implantation des sondages carottés.

Une fois la carotte réalisée, la seconde difficulté dans la détermination de la masse volumique de la maçonnerie est la représentativité de l'échantillon testé à l'échelle du barrage et le choix des méthodes utilisées pour réaliser la pesée.

Le choix de la masse volumique utilisée dans les calculs du barrage est également un élément difficile à appréhender. En effet, selon les essais réalisés la masse volumique mesurée correspond à une masse volumique sèche, ou humide, ou saturée voire équivalente aux conditions du site. Dans la littérature [3], la masse volumique retenue pour les calculs de stabilité est la masse volumique humide.

3.2.2 Méthodes

Différentes méthodes existent pour déterminer la masse volumique du matériau et notamment :

- La réalisation de pesée des caisses de carottes (à vide et pleine) afin d'obtenir directement la masse volumique de la maçonnerie (en considérant le volume théorique du forage) est la plus simple.

Elle n'est pas très précise (dépend des taux de récupération et basée sur un volume théorique) et doit être réalisée rapidement après la réalisation des carottes afin de limiter l'évaporation de l'eau et fournir une masse volumique proche de celle du barrage (masse volumique humide).

Elle a l'avantage de pouvoir être réalisée sur des échantillons importants et de donner une valeur représentative d'une quantité de matériaux relativement importante (sur toute la hauteur de l'ouvrage par exemple).

Le graphique 3 montre une carotte avec un taux de récupération inférieur à 90% pour laquelle cette méthode doit être complétée par une analyse permettant de statuer sur l'origine des vides et d'ajuster les valeurs calculées pour le volume des carottes.

La difficulté de ces mesures réside d'une part dans le choix de la teneur en eau à retenir afin de déterminer la masse volumique sèche (mesures à faire au laboratoire) et d'autre part dans l'interprétation du volume de carotte à utiliser en cas de récupération inférieure à 100%.

Sur les barrages de Pont-et-Massène et de Chazilly, les reconnaissances réalisées avant 2013, ont montré des taux de récupération moyens (localement inférieurs à 90%) et les inspections (imageries optiques) n'ayant pas mis en évidence de vides majeurs, il a été considéré que ces valeurs étaient liées à des pertes durant le carottage. Sur cette base la densité retenue a été évaluée en considérant la longueur réelle de la carotte (et non la longueur de la passe).



Graphique 3 : Carotte avec un taux de récupération inférieur à 90% (barrage de Pont-et-Massène)

- La réalisation de pesée des carottes, et la mesure du volume par une méthode de pesée hydrostatique après paraffinage des carottes en laboratoire, conformément à la norme NF P 94 410-2. Méthode précise, elle n'est applicable que sur des échantillons de taille réduite dont la représentativité peut être prise en défaut. Pour pallier cet inconvénient de nombreuses mesures sont nécessaires permettant la mise en œuvre d'une analyse statistique pertinente.

- La réalisation d'une mesure de densité en laboratoire sur le mortier et la roche pris séparément et l'agrégation de ces valeurs en prenant en compte les proportions de mortier et de moellons déterminées en laboratoire.
- La réalisation de mesures de la densité apparente dans le forage au moyen d'une sonde de rayonnement gamma. La technique permet d'avoir une densité apparente dans l'intégralité du forage (meilleure représentativité que des valeurs ponctuelles). L'étalonnage des mesures de densité doit en revanche être systématiquement réalisé avec des essais en laboratoire et des mesures sur site. Ces mesures ont été réalisées récemment sur les barrages de Pont-et-Massène et de Chazilly. On notera toutefois une imprécision annoncée de $0,1 \text{ t/m}^3$ voire plus, en raison des incertitudes d'étalonnage. Cette méthode ne peut donc pas être utilisée seule, et devra être couplée avec d'autres méthodes. Néanmoins, elle permet d'observer les éventuelles hétérogénéités dans le corps du barrage.

A noter que les éléments historiques de l'ouvrage, s'ils sont disponibles et jugés fiables, peuvent également être utilisés pour estimer la masse volumique de l'ouvrage. Cette donnée doit toutefois être utilisée avec discernement, le vieillissement de l'ouvrage et la perte de masse en découlant pouvant être important. Il peut également être intéressant, de comparer la valeur initiale aux masses volumiques déterminées par les essais pour juger d'un éventuel vieillissement de la maçonnerie (diminution de la masse volumique engendrée par lessivage du mortier).

3.2.3 Résultats et retour d'expérience

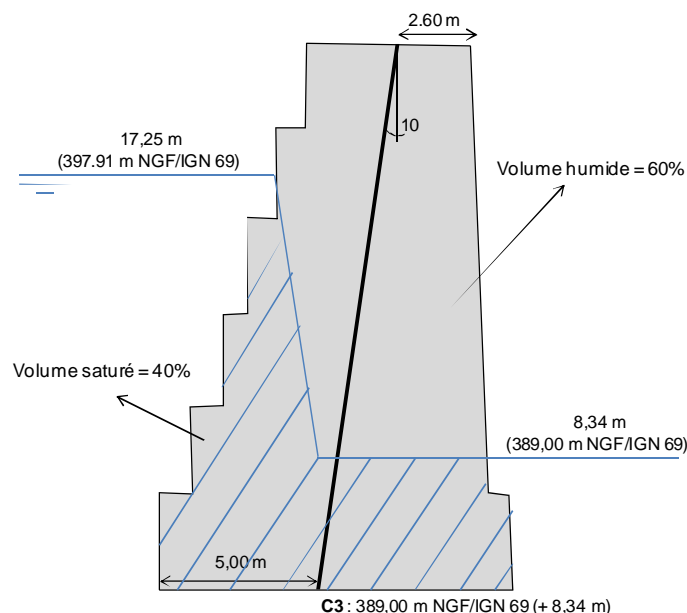
L'évaluation de la densité en place des maçonneries doit croiser au moins deux de ces méthodes pour limiter le risque de fausse appréciation, et être complété par un jugement d'expert synthétisant les résultats des mesures et calculs faits. L'impact sur les calculs de stabilité peut être très important : des écarts d'estimation de plus de 10-15% sont régulièrement observés.

En tout état de cause, l'ensemble des données disponibles doivent être intégrées et analysées afin d'avoir une analyse fine de la masse volumique effectivement retenue. On s'attachera notamment à ne pas retenir la masse volumique minimale obtenue sur les données mais plutôt une masse volumique moyenne plus représentative du barrage dans son ensemble.

Sur des projets récents, la bonne réalisation des sondages carottés a permis d'obtenir des carottes en bon état, avec un taux de récupération proche de 100%, permettant une détermination des masses volumiques à partir d'échantillons de grande dimension (jusqu'à 1,5 m) pour lesquels la masse volumique a pu être déterminée avec un bon niveau de précision.

Concernant la question de la saturation des maçonneries, il semble pertinent de retenir une masse volumique dite « équivalente » afin d'intégrer la saturation de la maçonnerie sous le niveau d'eau.

Si le niveau piézométrique dans le corps du barrage est suffisamment bien connu (appareils d'auscultation présents) et dans le cas de retenue à faible marnage, un niveau d'eau minimal dans l'ouvrage peut être défini de manière prudente. La maçonnerie sous ce niveau peut alors être considérée comme saturée et la masse volumique « équivalente » est alors égale à la somme de la part de volume de maçonnerie humide et de la part de volume de la maçonnerie saturée (exemple du graphique 4). Pour permettre cette approche, une détermination de masse volumique saturée doit être réalisée en laboratoire.



Graphique 4 : Proportion de volume retenu pour le calcul de la masse volumique

Si cette approche est retenue, la prise en compte de la saturation doit également être intégrée dans la détermination des autres paramètres (exemple : résistance à la compression et à la traction d'échantillons saturés).

Une synthèse des masses volumiques retenues pour les barrages cités dans l'article lors de différentes études est fournie dans le tableau 2.

Barrage :	Proportion mortier / pierre	Teneur en eau de la maçonnerie	Masse volumique sèche (t/m^3)	Masse volumique humide (t/m^3)	Masse volumique utilisée (t/m^3)
Chartrain	45% / 55%		2,27 t/m^3 (1,87 t/m^3 mortier et 2,6 t/m^3 pierre)		2,27 t/m^3
Chazilly	45% / 55%	3%		2,2 t/m^3	2,2 t/m^3
Lampy	40% / 60%	moellons 3% mortier environ 30%	1,69 à 1,92 t/m^3	2,01 à 2,06 t/m^3	2,05 t/m^3
Montaigut			2,2 t/m^3	2,35 t/m^3	2,35 t/m^3
Pont-et-Massène	35% / 65%	3%		2,25 t/m^3	2,25 t/m^3
Settons	47% / 53%		2,02 à 2,14 t/m^3 (1,52 t/m^3 min mortier et 2,46 t/m^3 min pierre)		2 calculs : 2 t/m^3 et 2,15 t/m^3
Gouffre d'Enfer	40% / 60%			2,24 t/m^3	2,24 t/m^3
Pas du Riot				2,3 t/m^3	2,3 t/m^3

Tableau 2 : Masse volumique retenue par barrage

Ces valeurs mettent en évidence des variations importantes de densité utilisées dans les calculs. Pour plusieurs de ces valeurs, il semble qu'une seule méthode ait été utilisée (souvent la mesure des masses volumiques en laboratoire sur quelques échantillons ou pesées des caisses de carottes). Notamment :

- Chartrain : la valeur retenue se base sur des mesures en laboratoire et correspond à une masse volumique sèche. Cette valeur est jugée élevée (dans la gamme des densités sèches), mais compensée par le fait que ce soit la densité sèche et non humide celle retenue dans les calculs. Cette valeur paraît raisonnable.

- Chazilly : la valeur retenue se base principalement sur la pesée de caisses de carottes de l'ensemble des sondages du site (en considérant les taux de récupération faibles comme des pertes de carotte) avec un croisement de la densité théorique calculée (données historiques), des mesures gamma-gamma et des analyses en laboratoire réalisées sur la pierre et le mortier lors de différentes campagnes. La masse volumique humide a été retenue plutôt qu'une masse volumique équivalente. Cette valeur paraît raisonnable.

- Lampy : la valeur retenue se base sur 6 pesées en laboratoire, sur des échantillons de 1,5 m, avec pesée de la maçonnerie puis de la pierre et du mortier comparées au volume théorique de l'échantillon. Malgré le soin apporté lors du carottage, il est possible que le volume réel de l'échantillon soit légèrement plus faible que le volume théorique ce qui conduit à des valeurs retenues apparaissant faibles.
- Montaigut : la valeur retenue s'est basée sur la pesée des caisses de carotte. La masse volumique humide a été retenue. Cette valeur paraît néanmoins quelque peu élevée.
- Pont-et-Massène : la valeur retenue se base principalement sur la pesée de caisses de carottes de l'ensemble des sondages du site (en considérant les taux de récupération faibles comme des pertes de carotte) avec un croisement de la densité théorique calculée (données historiques) et des mesures réalisées au gamma-gamma. La masse volumique humide a été retenue plutôt qu'une masse volumique équivalente. Cette valeur paraît raisonnable.
- Settons : la valeur retenue se base sur l'examen en laboratoire avec mesures de densité d'échantillons (avec mesures de la pierre et du mortier mais sans distinction de la masse volumique sèche ou humide). Des calculs de sensibilité ont alors été réalisés (2 et 2,15 t/m³). Le manque de mesures récentes rend le jugement des valeurs retenues difficile.
- Gouffre d'Enfer : la valeur retenue se base sur des pesées en laboratoire, avec pesée de la maçonnerie puis de la pierre et du mortier comparées au volume théorique de l'échantillon. La taille des échantillons n'est pas connue ni la méthode d'estimation du volume de l'échantillon ; la valeur retenue paraît raisonnable.
- Pas du Riot : la valeur retenue se base sur des pesées en laboratoire de 3 échantillons de maçonnerie saturés. La taille des échantillons n'est pas connue ni la méthode d'estimation du volume de l'échantillon ; la valeur retenue correspond à la masse volumique saturée, hypothèse optimiste.

Il est enfin intéressant de faire l'analogie avec d'autres ouvrages anciens maçonnés. Par exemple, des investigations ont été réalisées durant les travaux d'aménagement des rives de Saône se déroulant actuellement dans le centre ville de Lyon au droit des quais constitués de maçonnerie (moellons de calcaire, construits autours de 1860). Des mesures de densité humide ont été réalisées dans la maçonnerie et ont montré une valeur moyenne de 2.26 t/m³, valeurs voisines des densités retenues dans la plupart des barrages.

3.3 Détermination de la cohésion et de l'angle de frottement

3.3.1 Difficultés

La difficulté dans la détermination de la cohésion et de l'angle de frottement de la maçonnerie est la représentativité de l'échantillon testé à l'échelle du barrage.

La résistance de la maçonnerie est appréciée « à dire d'expert », en étayant le jugement à partir de différentes approches quantitatives. Ces approches sont les suivantes :

- Les mesures indirectes sur échantillon au laboratoire : mesures de traction et de compression sur carottes « saines ».
- Les mesures directes sur échantillon au laboratoire : mesures de cisaillement à la boîte, sur des joints pré-existants ou des joints sciés.
- L'approche par une méthode de type Hoek&Brown, en assimilant la maçonnerie du corps du barrage à un rocher de type conglomérat.
- L'approche par une méthode de type Barton, en assimilant également la maçonnerie du corps du barrage à un rocher de type conglomérat.

On distingue ici deux jeux de paramètres mécaniques : les paramètres de pic et les paramètres résiduels.

Les paramètres de pic règnent dans le corps de la maçonnerie dans son état actuel, tel qu'observé dans les carottes. C'est la résistance de la maçonnerie en faisant l'hypothèse qu'elle est microfissurée et fissurée, mais que cette fissuration est erratique ou, en tous cas, qu'elle ne forme pas une surface (horizontale ou oblique) le long duquel la partie supérieure du barrage peut glisser.

Les paramètres résiduels sont ceux que l'on trouve le long d'un plan de fissuration par frottement, après qu'il y a eu amorce de déplacement. Le long de ce plan, l'essentiel de la cohésion a disparu du fait de la fissuration / du glissement et les aspérités ont également été partiellement rabotées réduisant l'angle de frottement.

Le choix de ces valeurs est parfois difficile à appréhender notamment si peu d'essais existent. [3] préconise l'utilisation des valeurs de pic des résistances sauf cas particuliers (zone déjà fissurée, post-sismique).

Il convient enfin de préciser que ces caractéristiques sont fortement liées aux résistances à la compression et à la traction de la maçonnerie.

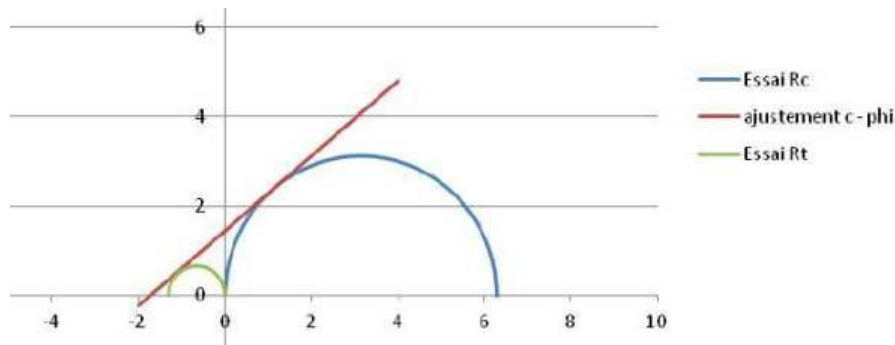
3.3.2 Méthodes

Il existe plusieurs méthodes permettant de déterminer ces paramètres. On distingue notamment :

- Les essais directs : ce sont notamment les essais de cisaillement direct dans la boîte de Casagrande. Ces essais permettent de déterminer les caractéristiques résiduelles et les caractéristiques de pic. Cependant, la représentativité de cet essai est limitée par la taille des carottes testées du fait des dimensions des boîtes de cisaillement existantes.

Les essais triaxiaux sont également envisageables mais peu réalisés du fait de leur coût et de la limitation des dimensions des échantillons testés. Ces essais sont difficiles à mettre en œuvre.

- Les essais indirects : les caractéristiques peuvent également être obtenues en réalisant des essais à la compression simple et des essais Brésiliens (traction) sur des carottes. En intégrant l'ensemble des essais réalisés (cercle de Mohr-Coulomb) une courbe enveloppe peut être tracée et permettre de déterminer un angle de frottement et une cohésion (exemple du graphique 5).



Graphique 5 : Exemple d'enveloppe de Mohr-Coulomb

A noter que ces essais présentent l'avantage d'être rapide et peu onéreux (moins de 100 € / essai). En revanche, ils ne permettent de déterminer que les valeurs de pics des résistances et le couple résistance à compression / résistance à la traction ne peut être obtenu avec un même échantillon. Enfin si le nombre d'essais disponibles est faible (inférieur à une dizaine) les résultats seront approximatifs du fait du nombre de combinaisons possibles de résultats : la résistance mesurée varie beaucoup en fonction de l'agencement des pierres et du mortier dans les carottes testées.

- L'approche de type Hoek&Brown : dans cette approche, on assimile la maçonnerie à un conglomérat, rocher formé de galets emballés dans une matrice plus ou moins cimentée. L'intérêt est alors de disposer d'une approche utilisée pour caractériser la résistance d'un milieu hétérogène, à grande échelle.

Dans cette méthode, le matériau conglomérat est caractérisé par :

- sa nature (coefficient m_i caractérisant la résistance triaxiale de la matrice rocheuse intact ; pour un conglomérat : $m_i = 21 \pm 3$),
- la résistance à la compression de la maçonnerie lorsqu'il n'est pas fissuré (déterminée par des essais de compression simple de la maçonnerie intacte),
- son état de décompression (coefficient D allant de 0 pour un matériau intact à 1 pour un matériau très perturbé),
- et son degré de fissuration (Geological Strength Index, GSI allant de 100 pour un matériau intact à 0 pour un matériau désagrégé). Une évaluation du RMR (Rock Mass Rating) est préconisée pour affiner la valeur du GSI retenue.

La résistance à la compression simple et la résistance à la traction simple de la maçonnerie dans son ensemble peuvent ensuite être déterminées.

La difficulté de cette approche est la détermination des paramètres nécessaires à la détermination des résistances globales. Cette approche permet d'obtenir les caractéristiques de pic de la maçonnerie.

On notera également, que l'approche de type Hoek&Brown conduit souvent à obtenir des jeux de paramètres plus élevés qu'avec les essais. Cela vient sans doute du fait que cette approche considère une rupture globale dans la masse et pour un milieu confiné, ce qui n'est pas le cas des autres méthodes présentées (rupture locale, qui ne profite pas de l'effet d'enchevêtrement des maçonneries, échantillon non confiné).

- L'approche de type Barton : dans cette approche, on assimile également la maçonnerie à un conglomérat. Elle se base sur une loi de comportement plastique des joints en tenant compte des paramètres particuliers au droit du joint (coefficient de rugosité : JRC, résistance à la compression de la paroi du joint : JCS, l'angle de frottement du joint, donc du mortier ici qui nécessite des essais de cisaillement du joint) et des observations faites sur les carottes. Cette approche permet d'obtenir les caractéristiques résiduelles de la maçonnerie.

3.3.3 Résultats et retour d'expérience

La détermination des valeurs des résistances de la maçonnerie doit se faire en croisant l'ensemble des mesures et des essais disponibles et seront estimées par l'expert. Quelle que soit l'approche, il s'agit d'utiliser des valeurs « raisonnablement prudentes » pour la cohésion et l'angle de frottement. « Prudent » signifie qu'on ne choisira pas les valeurs moyennes, mais des valeurs plus basses. « Raisonnablement » signifie qu'on ne choisit pas la valeur la plus basse, car la rupture éventuelle ne se produit pas localement, mais sur une surface importante : une éventuelle faiblesse localisée n'a pas grande signification.

De plus, si la détermination des valeurs de pics est réalisable avec différentes approches (essais directs et indirects, Hoek&Brown), la détermination des valeurs résiduelles est encore plus complexe du fait du nombre limité des méthodes (essais de cisaillements directs principalement et approche de type Barton). On s'attachera alors à retenir des caractéristiques plutôt pessimistes pour ces valeurs.

En toute première approche, il peut raisonnablement être envisagé une cohésion résiduelle nulle et un angle de frottement compris entre 35° et 37°.

Une synthèse des caractéristiques retenues des maçonneries pour les barrages cités dans l'article lors de différentes études est fournie dans le tableau 3.

Barrage :	Résistance à la compression de la maçonnerie	Résistance à la traction de la maçonnerie	Approche utilisée :	Cohésion et angle de frottement de pic (et résiduels) retenus
Chartrain	15 MPa (minimum)	1,2 MPa (minimum mesuré sur le mortier)	Essais indirects + Hoek&Brown	400 kPa / 45° (<i>en révision spéciale une cohésion de 1,4 MPa a été retenue</i>)
Chazilly	3 MPa	0 MPa (0,5 MPa pour la détermination des paramètres)	Essais directs + Essais indirects + Hoek&Brown	200 kPa / 45° (0 kPa / 35°)
Lampy	5 MPa (1,5 MPa à l'interface)	0 MPa	Essais indirects	0 kPa / 37°
Montaigut	6,26 MPa	0 MPa	Hoek&Brown	244 kPa / 45°
Pont-et-Massène	4 MPa	0 MPa (0,8 MPa pour la détermination des paramètres)	Essais directs + Essais indirects + Hoek&Brown	200 kPa / 45° (0 kPa / 35°)
Settons	5,5 à 6,3 MPa (mortier)			2 calculs : 0 kPa / 36° et 500 kPa / 36°
Gouffre d'enfer	4 à 7 MPa (mortier saturé) 9 à 14 MPa (mortier sec)	0,6 MPa (1/10 Rc)		100 kPa / 37°
Pas du Riot	-	0,3 à 0,6 MPa	rétrocalage sur l'historique des sollicitations subies	100 kPa / 37°

Tableau 3 : Valeurs de résistance retenues pour la maçonnerie par barrage

Ces valeurs mettent en évidence des hétérogénéités dans le choix des caractéristiques. Notamment :

- Chartrain : les caractéristiques ont été déterminées avec une approche Hoek & Brown ainsi qu'en utilisant les essais indirects (leur nombre étant néanmoins faible). Ces valeurs paraissent élevées (cohésion notamment) mais plus sécuritaires que celles utilisées lors de la révision spéciale.
- Chazilly : les caractéristiques ont été déterminées avec une approche Hoek & Brown, des essais directs (nombre limité) et des essais indirects (plusieurs dizaines de valeurs dont certaines ont été obtenues sur carottes saturées). Le croisement des valeurs a conduit à proposer des valeurs de pic et résiduelles raisonnables. Ces valeurs ont été confirmées durant la campagne de 2013. A noter que les valeurs obtenues sur les carottes saturées ne sont pas différentes des autres valeurs.
- Lampy : L'historique des valeurs retenues n'est pas certain et par précaution ces valeurs plutôt pessimistes ont été retenues.
- Montaigut : les caractéristiques ont été déterminées avec une approche Hoek & Brown. Les valeurs retenues sont quelque peu élevées. A noter que l'état des carottes (réalisation médiocre des forages carottés) n'a pu permettre la réalisation d'un nombre suffisant d'essais indirects permettant de compléter la présente approche.

- Pont-et-Massène : les caractéristiques ont été déterminées avec une approche Hoek & Brown, des essais directs (nombre limité) et des essais indirects (plusieurs dizaines de valeurs dont certaines ont été obtenues sur carottes saturées). Le croisement des valeurs a conduit à proposer des valeurs de pic et résiduelles raisonnables. Ces valeurs ont été confirmées durant la campagne de 2013. A noter que les valeurs obtenues sur les carottes saturées étaient globalement inférieures aux autres valeurs.
- Settons : L'historique des valeurs retenues n'est pas certain et par précaution, des valeurs pessimistes (sauf si ce sont des valeurs résiduelles) ont été retenues avec 2 jeux de paramètres. Il n'y a pas de précision sur la prise en compte de valeurs pics ou résiduelles. La prise en compte d'une cohésion élevée dans un des jeux de paramètres peut être discutée.
- Gouffre d'Enfer : faute de données spécifiques, et eu égard aux périodes de construction et à la localisation de l'ouvrage, les caractéristiques du barrage du Pas du Riot ont été reconduites.
- Pas du Riot : les caractéristiques ont été déterminées au moyen de 5 essais de cisaillement simple sur échantillons de mortier ; l'angle de frottement retenu est directement issu de ces essais mais la cohésion finalement retenue est plus élevée (20 à 80 kPa dans les essais) ; cette dernière est probablement légèrement surestimée. Il n'y a pas de précision sur la prise en compte de valeurs pics ou résiduelles.

A noter que systématiquement lors des calculs une résistance à la traction nulle est considérée dans la maçonnerie et à l'interface barrage / fondation lors des calculs de stabilité : cela signifie que dès lors que les contraintes dans le barrage sont négatives une fissuration de la maçonnerie est engendrée.

En effet, la résistance (de calcul) à la traction de la maçonnerie, en parement amont du barrage, représente la capacité de la maçonnerie à s'opposer à une ouverture de fissure en parement amont.

Cette capacité existe probablement, mais il est impossible d'en avoir la certitude. Il est possible par exemple que des effets thermiques ou de retrait à la construction, ou que des épisodes particulier (par exemple poussée occasionnée par l'englacement de la retenue) aient développé une fissure horizontale systématique en parement amont du barrage. Il est également possible qu'il existe, dans le corps du barrage, des surfaces de faiblesse qui correspondraient par exemple à une interruption puis reprise des travaux, en période hivernale. S'il y a fissure horizontale, alors il n'y a plus de résistance à la traction. Par prudence, on fait l'hypothèse qu'une telle fissure a pu se développer, et que la résistance à la traction est donc nulle.

Il est intéressant de faire l'analogie avec d'autres ouvrages en maçonnerie anciens et fortement sollicités. [4] a présenté les travaux de confortement qui ont eu lieu sur le pont Royal à Paris plus ancien que les barrages étudiés ici (ouvrage construit entre 1685 et 1689). Des essais à la compression ont été réalisés sur les maçonneries de l'ouvrage (maçonneries calcaire avec coin de mortier) montrant des valeurs de l'ordre de 8 MPa. A noter qu'aucun autre essai n'a été réalisé (notamment essais de traction ou de cisaillement direct).

Sur le même principe, des investigations ont été réalisées durant les travaux d'aménagement des rives de Saône se déroulant actuellement dans le centre ville de Lyon au droit des quais constitués de maçonnerie. Des résistances à la compression simple et à la traction simple ont été réalisées sur des échantillons de pierres maçonnées (exemple du graphique 6). Ces essais ont fournis des résistances moyennes à la compression de 6,3 MPa et à la traction de 1,5 MPa (peu d'échantillons testés toutefois ici). La résistance à la compression est proche de celles retenues pour les barrages présentés ici.



Graphique 6 : Exemple de carottes maçonnées testées (projet aménagement rives de Saône – Défilé)

4. ANALYSE DU VIEILLISSEMENT

4.1 Historique et difficultés

[2] a mis en évidence un certain vieillissement constaté des maçonneries au cours du temps par dissolution de la chaux du mortier du fait de la percolation de l'eau à travers la maçonnerie. Le vieillissement de la maçonnerie tend alors à diminuer la densité de l'ouvrage (perte de la masse), à diminuer ses caractéristiques (perte du liant) et à augmenter sa perméabilité (augmentation des chemins préférentiels). Il est également fait état d'un endommagement, plutôt en surface, de la pierre maçonnée sur certains ouvrages (barrages constitués de moellons en calcaire).

Pour établir l'éventualité d'un vieillissement, les données d'époque sont utilisées et analysées (proportion de chaux dans le mortier, proportion de mortier et de pierre, densité de calcul).

Une des principales difficultés rencontrées est l'absence ou la non fiabilité de ces données. Si les données de construction ne sont pas disponibles, des campagnes géotechniques passées peuvent toutefois être mises à profit.

Dans le cas particulier des barrages de Chazilly et de Pont-et-Massène, les données d'archive permettent d'avoir des indications quant au dosage du mortier et à sa constitution. Le mortier du barrage de Chazilly est par exemple constitué de chaux réalisée sur site par cuisson ainsi que de sous-carbonate. La composition des maçonneries est connue assez précisément grâce à des courriers de réclamation des entreprises à la fin des travaux qui mettent en évidence un taux d'absorption du mortier plus important que le prévisionnel : 0,41 à 0,48 m³ de mortier par mètre cube de maçonneries (pour 0,4 m³ de mortier par mètre cube de maçonnerie prévisionnel).

4.2 Détermination d'un vieillissement

Afin d'estimer le vieillissement de la maçonnerie du barrage les examens et reconnaissances suivants peuvent être réalisés :

- Observations indirectes sur site : l'observation des sondages géotechniques est un élément intéressant dans la détermination du vieillissement (sous réserve d'une réalisation de sondage permettant de l'apprécier). Des passages de mortier désagrégés (matériaux pulvérulents) et/ou des vides peuvent être observés sur les carottes et le long de la paroi de forage.

- Reconnaissances géotechniques : les analyses qui sont faites sur la carotte (mesure de la densité et comparaison éventuelle avec des carottes anciennes) sont également de bons indicateurs. Dans la mesure du possible il est également recommandé dans le cadre de mesures de densité de réaliser ces mesures sur les carottes récemment prélevées mais également sur les carottes anciennes (souvent entreposées à proximité) afin d'évaluer la perte de densité dans le temps.

- Analyse du mortier dans le but d'évaluer une perte de liant, une diminution de la proportion de chaux (sous réserve d'avoir un échantillon étalon permettant d'apprécier ces différences). Peuvent être réalisés :

- des examens microscopiques,
- une analyse qualitative par diffraction des rayons X (permettant d'identifier les minéraux présents et de rechercher des composés cristallisés constituant la phase liante du mortier),
- et un examen au microscope électronique à balayage couplé au spectromètre X à dispersion d'énergie (permettant de caractériser la microstructure du mortier, de reconnaître des hydrates et/ou des carbonates le constituant et de rechercher tous types de phénomènes de dégradation d'origine physico-chimique).

Une détermination de la composition minéralogique quantitative du mortier (formulation en pourcentage massique) par l'intermédiaire du « calcul Minéraux LCPC », comprenant l'identification du liant par microscopie optique, l'analyse thermogravimétrique et l'analyse chimique de la fraction « soluble » peut également être réalisée. A noter que ces analyses restent spécifiques et que peu de laboratoire ont les moyens pour réaliser ces prestations. Le coût de ces analyse est également élevé (entre 2 000 et 3 000 €/échantillon). Ces investigations sont peu utilisées dans le cas des barrages mais plus fréquentes lors de diagnostics d'ouvrages d'art et/ou monuments historiques.

A défaut de pouvoir comparer des échantillons d'âge différent, on peut comparer l'état des maçonneries dans différentes zones soumises à différentes cinétiques de vieillissement : près de la crête (gel/dégel, sels de déverglaçages) ; en partie basse, dans les zones de suintement ; en partie haute, au-dessus des zones de suintement.

4.3 Retour d'expérience

L'appréciation du vieillissement des maçonneries reste délicate. Deux exemples sont donnés ici.

Les moellons des barrages de Chazilly et de Pont-et-Massène n'ont pas (ou très peu) vieilli. La question s'est en revanche posée pour le mortier. Les mesures de densité et les quelques essais mécaniques disponibles aux différentes époques n'ont pas montré de vieillissement manifeste : la densité récente, mesurée pour différentes méthodes, est du même ordre de grandeur que ce qui a dû être mis en place (densité théorique sèche calculée à 2,1 pour le barrage de Chazilly contre 2,05 obtenu aujourd'hui) et les essais mécaniques réalisés ne montraient pas non plus d'affaiblissement caractérisé de la structure. Le seul signe pouvant mettre en évidence un vieillissement est l'apparence poreuse du mortier obtenu dans les carottes. A noter que la porosité du mortier n'a pas été évoquée dans le passé (cela veut-il dire pour autant qu'elle ne l'était pas ?).

A l'inverse, les quelques densités disponibles sur le barrage du Lampy ont mis en évidence une diminution de la densité moyenne de mortier en 20 ans allant de 1,68 t/m³ en 1991 à 1,31 t/m³ en 2011. Cette diminution est élevée et la représentativité des échantillons testés (même état hydrique ?) peut être discutée.

Les analyses du mortier réalisées sur les barrages de Chazilly et de Pont-et-Massène n'ont pas confirmé ou infirmé le vieillissement de la maçonnerie. Toutefois, des variations de teneur en liant ont pu être observées sur certaines carottes testées : vieillissement ou défaut de construction ?

Une idée de principe pourrait être davantage utilisée. S'il y a vieillissement des maçonneries, ce vieillissement n'est certainement pas homogène dans l'ouvrage. Ainsi, des reconnaissances faites aujourd'hui qui ne montrent pas d'hétérogénéité manifeste dans le corps du barrage sont probablement la signature d'une maçonnerie qui a peu ou pas vieilli.

5. RECOMMANDATIONS CFBR

5.1 Rappels et utilisation

[3] recommande les règles à utiliser pour la justification de la stabilité des barrages poids. Ce chapitre ne vise pas à reprendre les éléments énoncés dans ce document mais à rappeler les points importants en relation avec la présente communication.

Les recommandations préconisent de réaliser les calculs de stabilité en considérant les valeurs de pic des résistances de la maçonnerie pondérées par des coefficients partiels variant de 1 à 3 selon la combinaison étudiée (quasi-permanente, rare, extrême).

Une incertitude demeure dans les valeurs retenues, qui doivent être dans le sens de la sécurité, tout en veillant à être réalistes (exemple : une cohésion nulle et un angle de frottement de 35° pour la justification de la stabilité du barrage ; caractéristiques s'apparentant plus à un sable de bonne facture qu'à un ouvrage maçonné même dégradé : est-ce judicieux ?).

Ces coefficients visent alors à « sécuriser » les caractéristiques retenues proposées par l'expert et discutables entre experts.

Cependant, les valeurs résiduelles peuvent être intéressantes à exploiter (si elles sont bien estimées) pour certains calculs (calculs post-sismique, barrage ou fondation fissurée).

A noter qu'historiquement, les notions de valeurs de pic ou valeurs résiduelles n'étaient que rarement distinguées dans les études de stabilité. Aussi, certaines études ont pu être établies en considérant des valeurs résiduelles associées aux coefficients de sécurité historiquement appliquées (sur les charges). Au regard de la réglementation actuelle, ces calculs peuvent parfois s'avérer pessimistes.

Enfin, la densité (poids volumique humide) déterminant le poids propre de l'ouvrage n'est pas pondérée d'un coefficient (démarche identique aux Eurocodes) tout comme les autres charges de l'ouvrage.

5.2 Propositions complémentaires

Au regard des différents éléments exposés dans le présent article et notamment de la difficulté, d'une part d'incertitude et d'une certaine subjectivité dans le choix des résistances et de la densité de l'ouvrage calculé, il pourrait être envisagé la vérification de la stabilité avec les combinaisons d'actions suivantes :

5.1.1 Combinaison extrême des résistances de la maçonnerie

L'objectif de cette combinaison serait de s'assurer que « le barrage tient » même si, pour une raison quelconque, la maçonnerie est entièrement fissurée.

La combinaison d'actions des résistances de la maçonnerie, définie comme une combinaison extrême, prend en compte :

- Les valeurs caractéristiques des actions permanentes : poids propre (G_{0k}) et éventuelles charges d'exploitation (G_{4k}), poussée des sédiments (G_{1k}), action de la recharge aval (G_{2k}), action des tirants précontraints (G_{3k}).

- Les intensités des actions de l'eau obtenues pour la cote des plus hautes eaux (PHE) : Q_{1-rare} (intensité de la poussée hydrostatique amont pour les PHE), Q_{2-rare} (intensité de l'action des sous-pressions pour les PHE) et Q_{3-rare} (intensité de l'action de la poussée hydrostatique aval pour les PHE).

La combinaison à calculer serait alors : $\{G_{0k} + G_{1k} + G_{2k} + G_{3k} + G_{4k} + Q_{1-rare} + Q_{2-rare} + Q_{3-rare}\}$

La vérification des états limites se faisant en considérant les valeurs résiduelles de résistance de la maçonnerie pondérées par les coefficients partiels définis pour les combinaisons extrêmes.

Cette combinaison a été appliquée pour les calculs de stabilité réalisés sur les barrages de Pont-et-Massène et de Chazilly.

5.1.1 Combinaison extrême du vieillissement de la maçonnerie

L'objectif de cette combinaison serait de vérifier que le dimensionnement intègre une marge pour vieillissement futur.

La combinaison d'actions accidentelle du vieillissement de la maçonnerie, définie comme une combinaison extrême, prend en compte :

- Les valeurs caractéristiques des actions permanentes : poids propre du barrage calculé en considérant le vieillissement de la maçonnerie ($G_{0k-vieillessement}$) et éventuelles charges d'exploitation (G_{4k}), poussée des sédiments (G_{1k}), action de la recharge aval (G_{2k}), action des tirants précontraints (G_{3k}).

- Les intensités des actions de l'eau obtenues pour la cote des plus hautes eaux (PHE) : Q_{1-rare} (intensité de la poussée hydrostatique amont pour les PHE), Q_{2-rare} (intensité de l'action des sous-pressions pour les PHE) et Q_{3-rare} (intensité de l'action de la poussée hydrostatique aval pour les PHE).

La combinaison à calculer serait alors : $\{G_{0k-vieillessement} + G_{1k} + G_{2k} + G_{3k} + G_{4k} + Q_{1-rare} + Q_{2-rare} + Q_{3-rare}\}$

La vérification des états limites se faisant en considérant les valeurs de pic de résistance de la maçonnerie pondérées par les coefficients partiels définis pour les combinaisons extrêmes.

Le poids propre du barrage en considérant le vieillissement de la maçonnerie peut être approché en se basant sur une estimation du vieillissement (plusieurs campagnes géotechniques sur plusieurs décennies) ou par hypothèse. Par exemple, il pourra être considéré un abaissement du poids des maçonneries correspondant à une perte totale de liant (soit environ 6 à 9% de la masse totale de la maçonnerie en première approche en considérant une proportion de chaux et de mortier courante).

Cette combinaison a été appliquée pour les calculs de stabilité réalisés sur le barrage de de Chazilly en considérant une densité égale à 2 t/m^3 . Elle n'a pas conduit à modifier substantiellement les conclusions.

6. CONCLUSIONS

Les études récentes ou plus anciennes réalisées dans le cadre de projet de confortement suite à une révision spéciale de l'ouvrage ou de l'actualisation des études de stabilité intégrées aux études de danger ont permis de faire un état des connaissances et des difficultés rencontrées lors de l'établissement des paramètres de calculs de la maçonnerie utilisés dans la justification de la stabilité des barrages poids maçonnés.

Quelque soit le paramètre utilisé (poids volumique, angle de frottement ou cohésion) plusieurs types de mesures existent et permettent d'obtenir, en fonction de l'investissement consentis par les propriétaires d'ouvrages, une large gamme de valeur. Néanmoins, ces valeurs sont souvent éparpillées et il n'existe pas de règles visant à déterminer précisément ces paramètres : c'est là qu'intervient l'expertise des bureaux d'études spécialisés dans le domaine. Néanmoins, l'expérience montre (nombreuses études de stabilité réalisées par

différents bureaux d'études et à différentes époques) que plusieurs interprétations sont envisageables et qu'une part de subjectivité (propre à chaque bureau d'études voire à chaque expert) existera toujours dans le choix des paramètres. A cela, vient s'ajouter un vieillissement plus ou moins rapide et prononcé de la maçonnerie durant la vie de l'ouvrage également difficile à quantifier.

Cette communication tire le retour d'expérience d'études récentes de caractérisation géomécanique de maçonnerie, pour proposer des éléments de décision sur les méthodes d'investigation à utiliser.

Elle propose également l'intégration de combinaisons complémentaires pour justifier de la stabilité des barrages poids maçonnés afin de tenir compte d'une part du vieillissement de la maçonnerie et d'autre part des caractéristiques résiduelles de la maçonnerie.

7. RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Royet, P., Noret-Duchene, C., Brunet, C., Cochet, D, & Lino, M. (1993). *Synthèse sur le vieillissement et la réhabilitation des barrages français en maçonnerie*. CFGB, colloque technique, Chambéry.
- [2] Royet, P., Francq, J., Bayet, L., & Boutet, J. M. (2003). *Diagnostic et réhabilitation des barrages français en maçonnerie*. CIGB, 21^{ème} congrès des grands barrages, Montréal (Q.82-RF.1).
- [3] Groupe de travail du CFBR. (2012). *Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages-poids*. CFBR.
- [4] Bustamante, M., Gadret, J. P. & Marque, C. (1990). *Confortement par injection d'une arche du pont Royal à Paris*. Bulletin liaison Ponts et Chaussées, n°166 – Réf. 3479.
- [5] Bordes, J. L. (2005). *Les barrages-réservoirs en France – Du milieu du XVIII^e au début du XX^e siècle*. Presse de l'école nationale des Ponts et Chaussées.