



Les Barrages, à la fois une source d'énergie et une sécurité d'approvisionne ment en eau

Conférence CERES
Liège, 09/05/2023

CRISE CLIMATIQUE, SÉCHERESSE



**CONFERENZA
Forum Siccità**
20 marzo 2023, ore 09.00

Emergenza acqua

Siccità in Veneto, Zaia: "Situazione tragica e problematica". Al vaglio un'ordinanza anti sprechi

Per riequilibrare la situazione servirebbe nel mese di marzo, e siamo già a metà, il triplo della pioggia caduta in media negli ultimi 30 anni

L'allarme di Coldiretti sulla siccità

Italia a secco. La primavera anticipa le primizie: fave e asparagi già sui banchi del mercato

L'impatto della siccità sul delta del Po e la sua economia

La penetrazione dell'acqua salata nell'entroterra è aumentata dai due chilometri negli anni '60 e i 10 chilometri negli anni '80, alla distanza record di 38 chilometri di quest'anno. Agricoltura e pesca messe in ginocchio dal cuneo salino

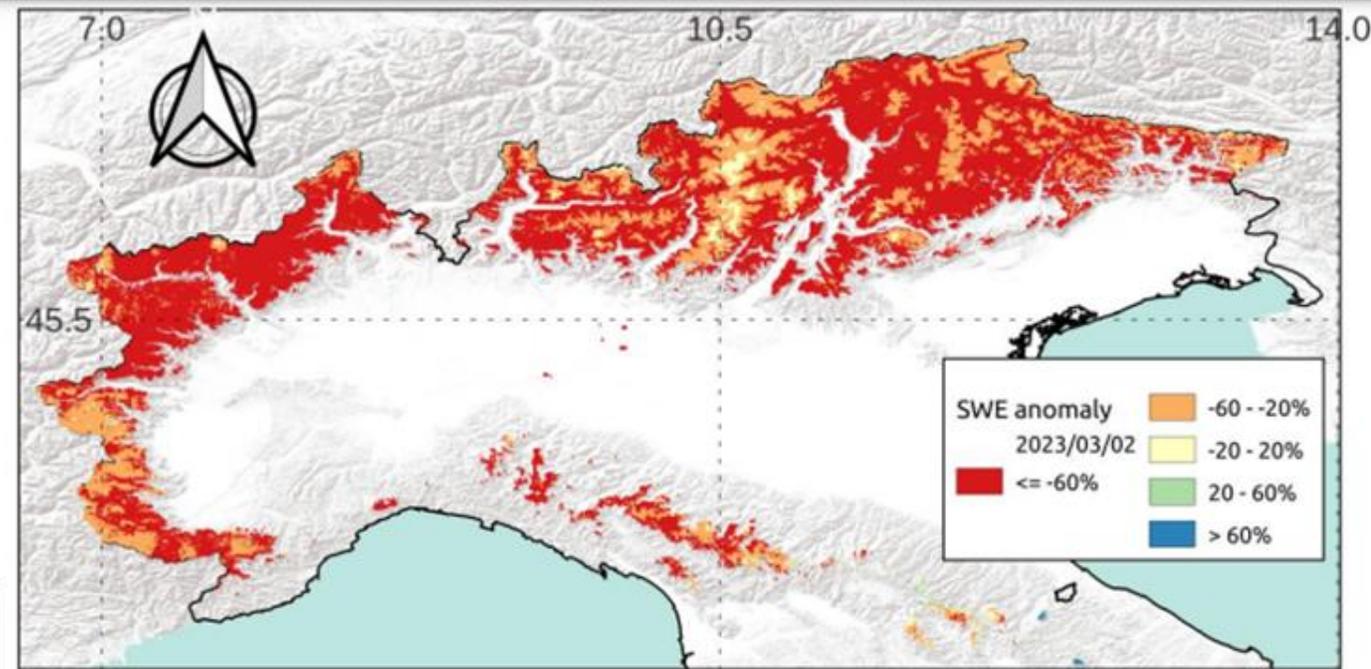
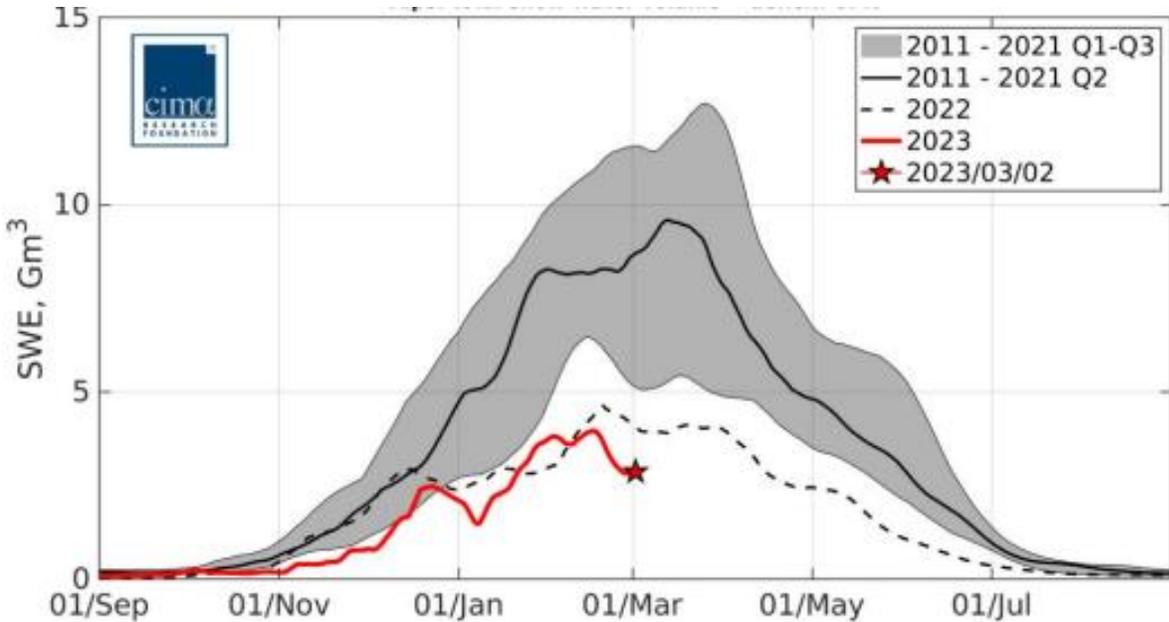
Piemonte, l'allarme siccità rimane altissimo

Dalle Alpi alla pianura, la pioggia attesa non è arrivata. Cartoline di un inverno anomalo

CRISE CLIMATIQUE, SÉCHERESSE

Déficit du volume de neige dans les Alpes. Mars 2023

SWE=Snow Water Equivalent
(Quantité d'eau stockée dans la neige)



SÉCHERESSE

Siccità 2022



Fiume Po a Torino
Fonte: le Scienze



Fiume Songone a Beinasco
Fonte: Il Fatto Quotidiano



Fiume Sesia a Palestro
Fonte: Samuele Giatti



Fiume Stura di Demonte a Fossano
Fonte: La Fedeltà



Fiume Sesia a Vercelli
Fonte: Ansa.it Piemonte



Fiume Po
Fonte: VITA



Fiume Ticino
Fonte: 3B meteo

GESTION NATIONALE DES FINANCEMENTS

Le MIT, [Ministère des Infrastructures et des Transports](#), coordonne au niveau national la [planification des ressources et des investissements](#).



Priorités de ces investissements :

- Rendre les [infrastructures primaires hydrauliques efficaces et résilientes](#) (grands réseaux de distribution, réservoirs, grandes dérivations), en vue de s'adapter au [changement climatique actuel](#), afin de garantir que les crises de l'eau, désormais de plus en plus fréquentes, puissent être surmontées [en dépassant la politique de "l'urgence "](#).
- Planifier et mettre en œuvre les [travaux d'entretien nécessaires surtout pour la modernisation et/ou le maintien de la sécurité](#) des grands et petits barrages, mais aussi des grands systèmes de dérivation et d'adduction d'eau, tant du point de vue de la sécurité des ouvrages structurels que de la [récupération/augmentation de la capacité utile et de transport](#), et donc de la valeur économique, ainsi que d'une gestion plus efficace des ressources hydriques et d'une [réduction concomitante des pertes](#), y compris dans les réseaux de distribution.

Sécurité d'approvisionnement en eau

Sécurité des infrastructures et optimisation de la gestion de l'eau

Gestion des financements

Plus précisément en ce qui concerne les **grands barrages**:

- [nouvelle planification des réservoirs à usages multiples](#), en mettant l'accent sur [l'eau potable, l'irrigation et en particulier sur les usages hydroélectriques](#), une priorité dans les scénarios de crise internationale actuelle, et pour assurer la stabilité du réseau électrique national, en suivant également le [développement des énergies renouvelables non programmables](#).
- renforcer la numérisation des réseaux, pour les transformer en "[réseaux intelligents](#)", en vue d'une [gestion optimale des ressources en eau, en réduisant le gaspillage et l'inefficacité](#).
- [compléter et moderniser les grands barrages inachevés dans les régions du sud de l'Italie](#), en développant les usages multiples de la ressource

	<i>Costo (mln €)</i>	<i>Risorse ripartite (mln €)</i>	<i>Fabbisogno residuo (mln €)</i>
<i>Piano nazionale di interventi infrastrutturali e per la sicurezza nel settore idrico*</i>		590	
<i>Piano operativo Dighe - FSC 2014-2020</i>		468	
<i>Programma operativo risorse idriche</i>		187	
<i>PNRR–M2C4–I4.1 Infrastrutture idriche primarie per la sicurezza dell’approvvigionamento idrico (risorse aggiuntive PNRR)</i>		900	
<i>PNRR–M2C4–I4.1 Infrastrutture idriche primarie per la sicurezza dell’approvvigionamento idrico (risorse da programmare a legislazione vigente, Piano nazionale di interventi infrastrutturali e per la sicurezza nel settore idrico)</i>		708,5	
<i>PNRR–M2C4–I4.2 Riduzione delle perdite nelle reti di distribuzione dell’acqua, digitalizzazione e monitoraggio delle reti (avviso pubblico in corso)</i>		900	1.200**
<i>PON INFRASTRUTTURE E RETI 2014-2020 – ASSE IV “REACT-EU”</i>		482	
<i>FSC 2021-2027 – Linea d’intervento Infrastrutture idriche</i>		442	
TOTALE		13.559	7.681,5***

Agenda de la Conférence

- 1 Panorama des barrages en Italie
- 2 Fonctions des barrages
- 3 Types de barrages et leur fonctionnement
- 4 Composantes d'un barrage et de son aménagement
- 5 Energie renouvelable et transition écologique, l'enjeu d'aujourd'hui
- 6 L'étude des barrages, un métier passionnant

Panorama des barrages en Italie

Combien y-a-t 'il de barrages en Italie? Où sont-ils situés? Quel âge ont-ils?



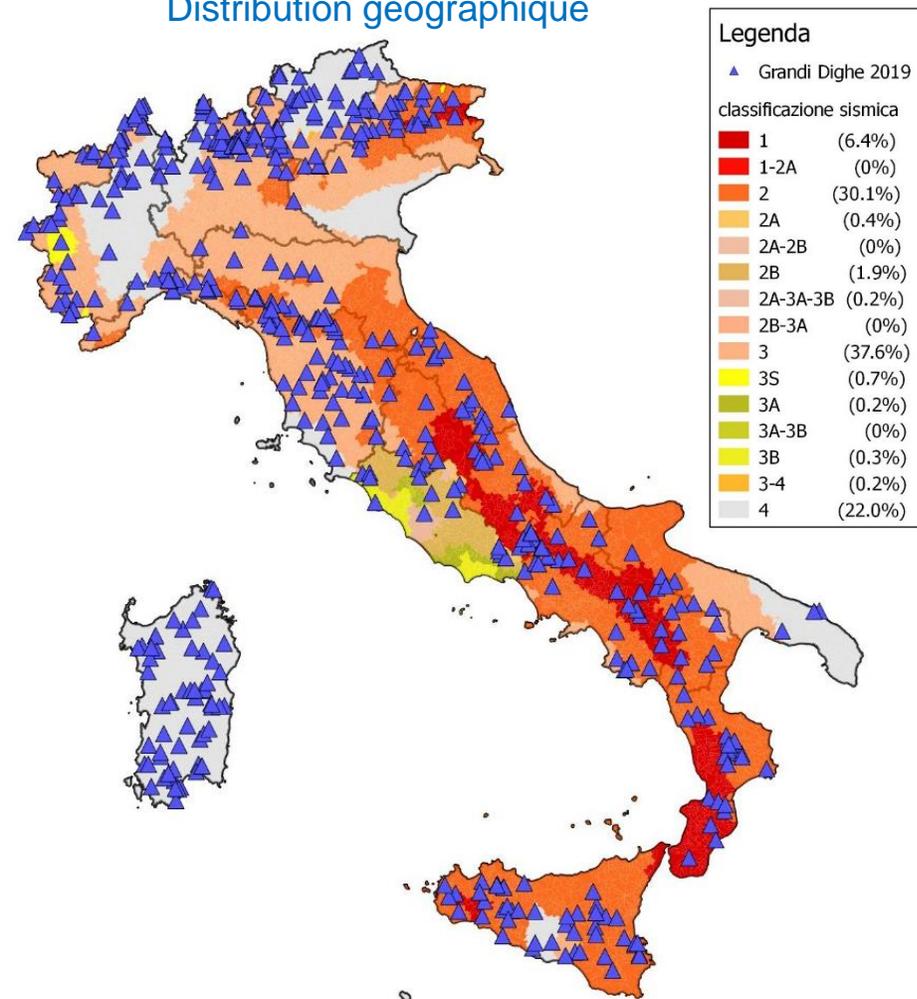
**Les Barrages,
à la fois une
source d'énergie
et une sécurité
d'approvisionne
ment en eau**

Conférence CERES
Liège, 09/05/2023

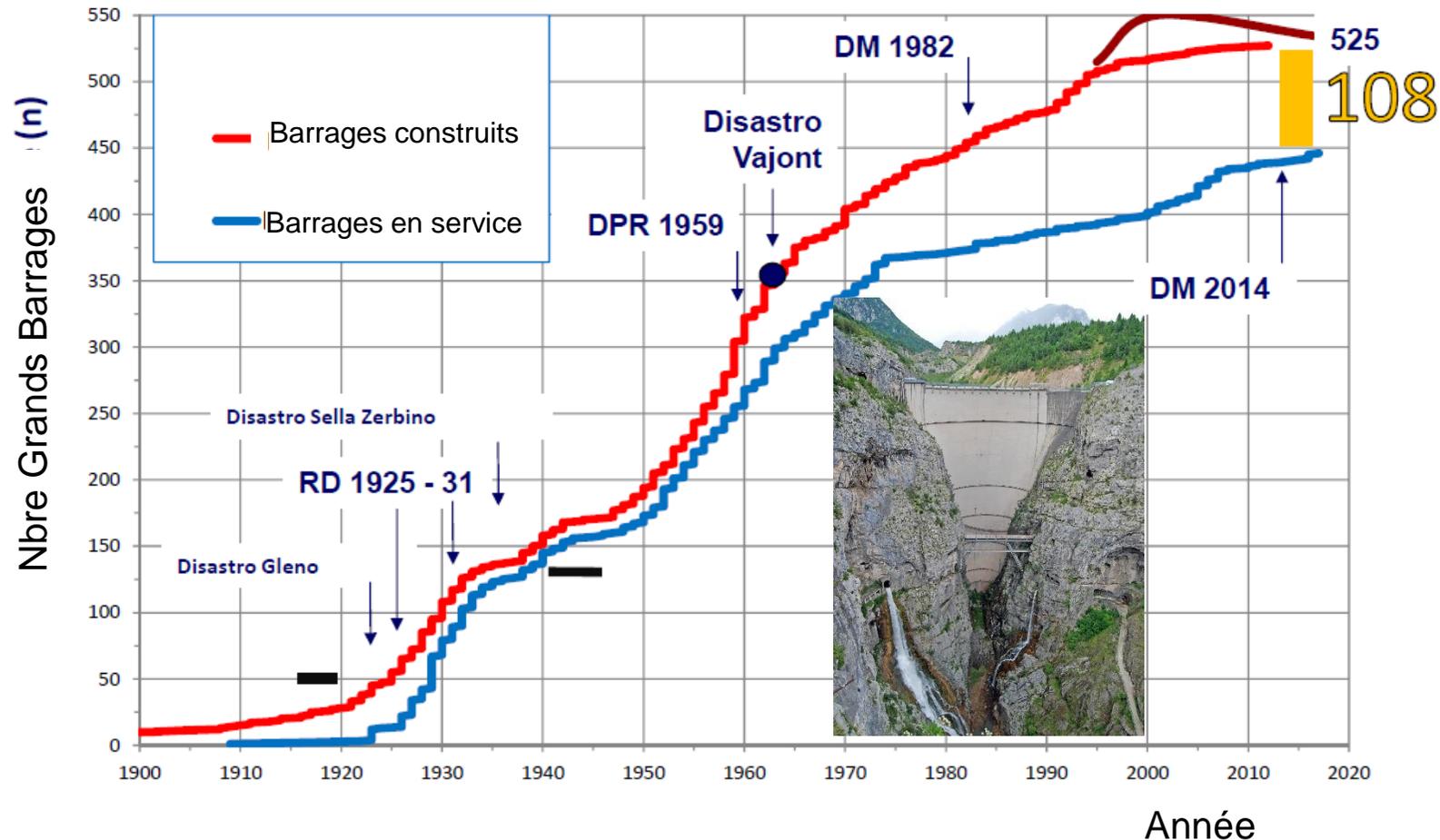
Panorama des barrages en Italie

Définition GRAND BARRAGE: Hauteur de retenue supérieure à 15m et/ou volume d'eau retenue supérieure à 1 million de m³

Distribution géographique



Historique de la construction des grands barrages en Italie



Commissions nationales et internationales

- International : ICOLD – International Commission on Large dams
- Italie : ITCOLD – Comitato Nazionale Italiano per le Grandi Dighe
- France : CFBR - Comité Français des barrages et réservoirs
- Suisse: Comité Suisse des barrages
- USA : USACE - United States Army Corps of Engineers
USBR - United States Bureau of Reclamation
FERC - Federal Energy Regulatory Commission



Normes italiennes

- NTD14. D.M. del 26 giugno 2014. Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse), Giugno 2014.
- MIT-DGD18. Istruzioni per l'applicazione della normativa tecnica di cui al DM 26.06.2014 (NTD14) e del DM 1701 2018 (NTC18), Luglio 2018.
- MIT-DGD19. Verifiche sismiche delle grandi dighe, degli scarichi e delle opere complementari e accessorie – Istruzioni per l'applicazione della normativa tecnica di cui al D.M. 26.06.2014 (NTD14) e al D.M. 17.01.2018 (NTC18), giugno 2019.
- INGV-MIT-DG Dighe. Linee guida per la redazione e le istruttorie degli studi sismotettonici relativi alle grandi dighe – 2017

Fonctions des barrages

A quoi servent les barrages? Peuvent-ils remplir plusieurs fonctions différentes?



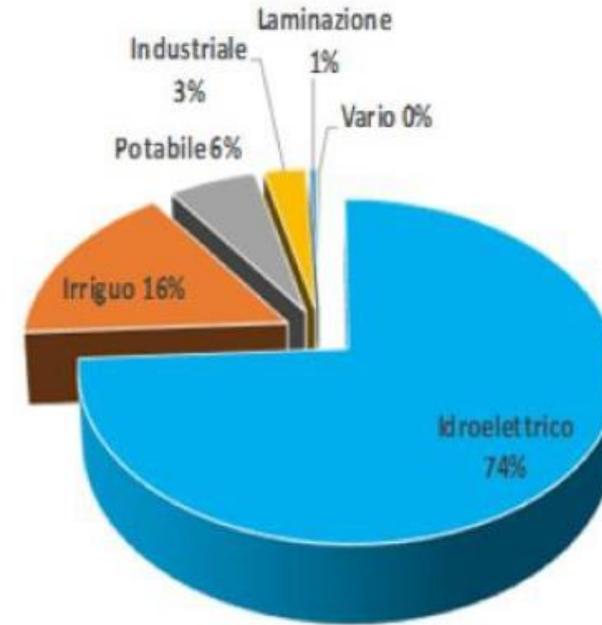
**Les Barrages,
à la fois une
source d'énergie
et une sécurité
d'approvisionne
ment en eau**

Conférence CERES
Liège, 09/05/2023

Les fonctions des barrages

Répartition au niveau national pour les grands barrages:

- Hydro-électricité (74%)
- Irrigation et agriculture (16%)
- Alimentation en eau (usage domestique ou industriel) (9%)
- Ecrêtement des crues (Lamination) (1%)
- Fonction récréative touristique, pêche
- Barrages à buts multiples



Alimentation en eau / Irrigation et agriculture

Les précipitations vont en grande partie dans les océans et mers, une portion très limitée s'infiltrer et approvisionne les [nappes phréatiques](#). Avec le changement de climat actuel, en Italie, de plus en plus, les pluies sont caractérisées par des [événements météorologiques extrêmes](#), avec de très fortes précipitations concentrées en un laps de temps extrêmement court, [qui ne permettent pas l'infiltration et la recharge des nappes phréatiques](#).

Les barrages planifiés, conçus, construits et entretenus correctement pour stocker l'eau permettent de répondre à nos besoins d'approvisionnement en eau. [Pour ajuster les variations des cycles hydrologiques, les barrages et réservoirs sont nécessaires pour stocker l'eau et approvisionner avec régularité lors de pénurie.](#)

Les fonctions des barrages: **Hydro-électricité**

La production constante d'électricité exige un débit qui ne soit pas variable comme celui des fleuves et qui soit disponible au moment voulu. La création des barrages a résolu ces deux problèmes.

L'eau accumulée dans le réservoir est dérivée dans des conduites qui l'amènent à l'usine. Elle actionne une turbine qui entraîne un alternateur qui produit l'énergie électrique.

L'électricité générée par les barrages est la plus grande source d'énergie renouvelable au monde. L'hydro-électricité offre aussi la possibilité unique de gérer les réseaux électriques grâce à sa capacité de produire rapidement en fonction des pics de demande.

Lorsque les usines sont conçues pour travailler en modalité réversible, c'est-à-dire **pompage-turbinage**, l'eau est turbinée en journée lors de la période de pointe et elle est de nouveau pompée dans le réservoir amont pendant la nuit, lorsque la demande est basse (stockage). Ce système constitue aujourd'hui pratiquement le seul moyen de stocker de l'électricité de façon économique (batterie).

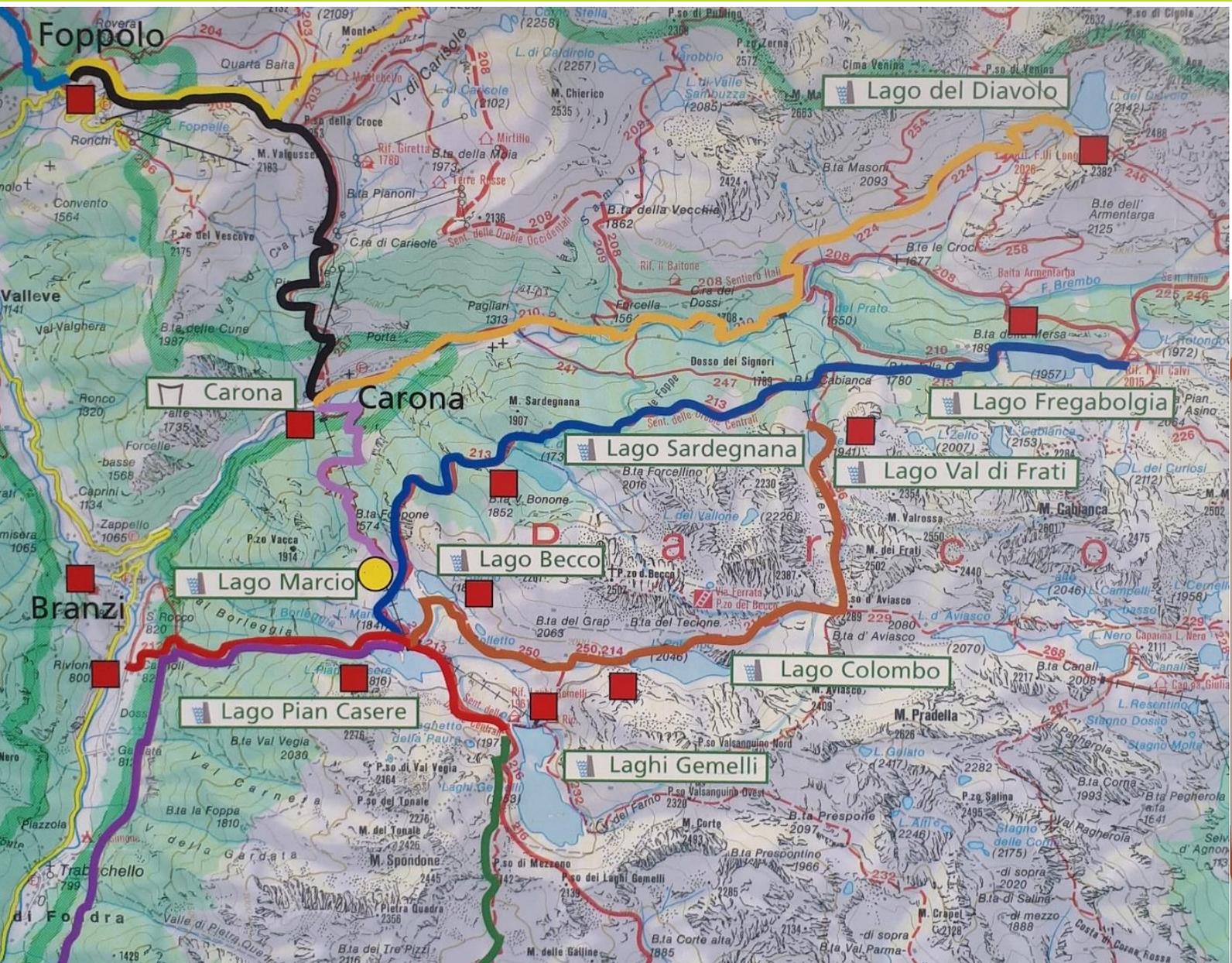


Les fonctions des barrages: **Hydro-électricité -TURBINAGE**

Complexe hydro-électrique de la Val Brembana (au Nord de Bergame)
de Enel Green Power; Puissance de turbinage: 48 MW

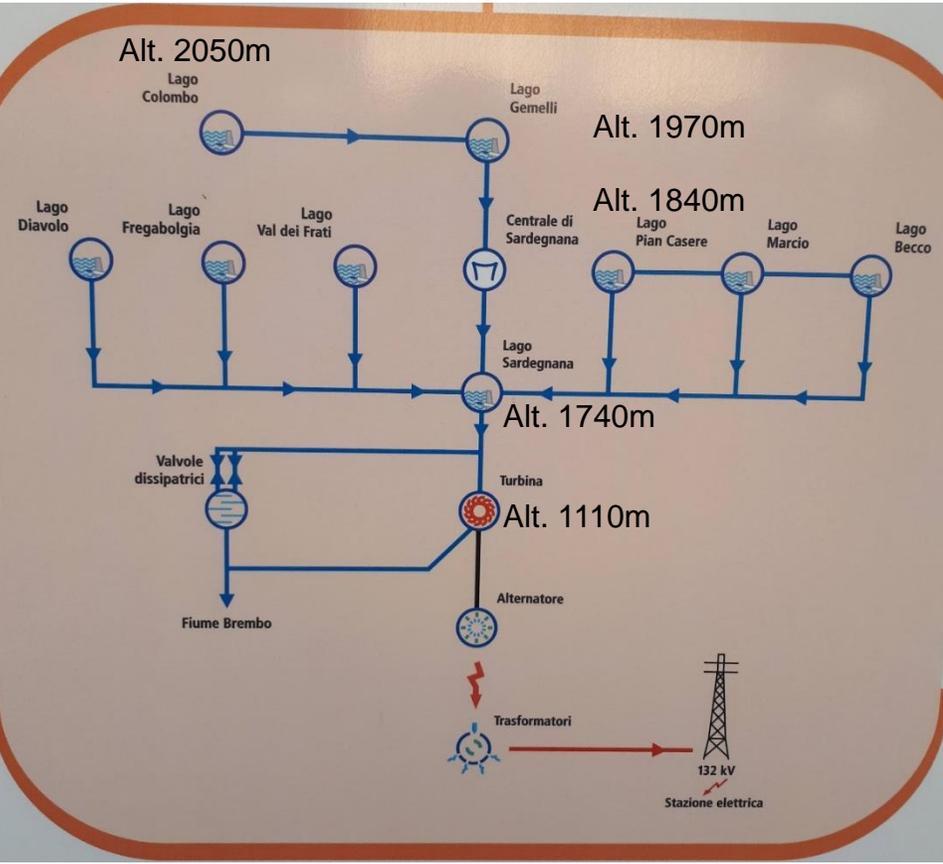
Usine de Carona style Liberty (1922-1932)





Les fonctions des barrages: Hydro-électricité

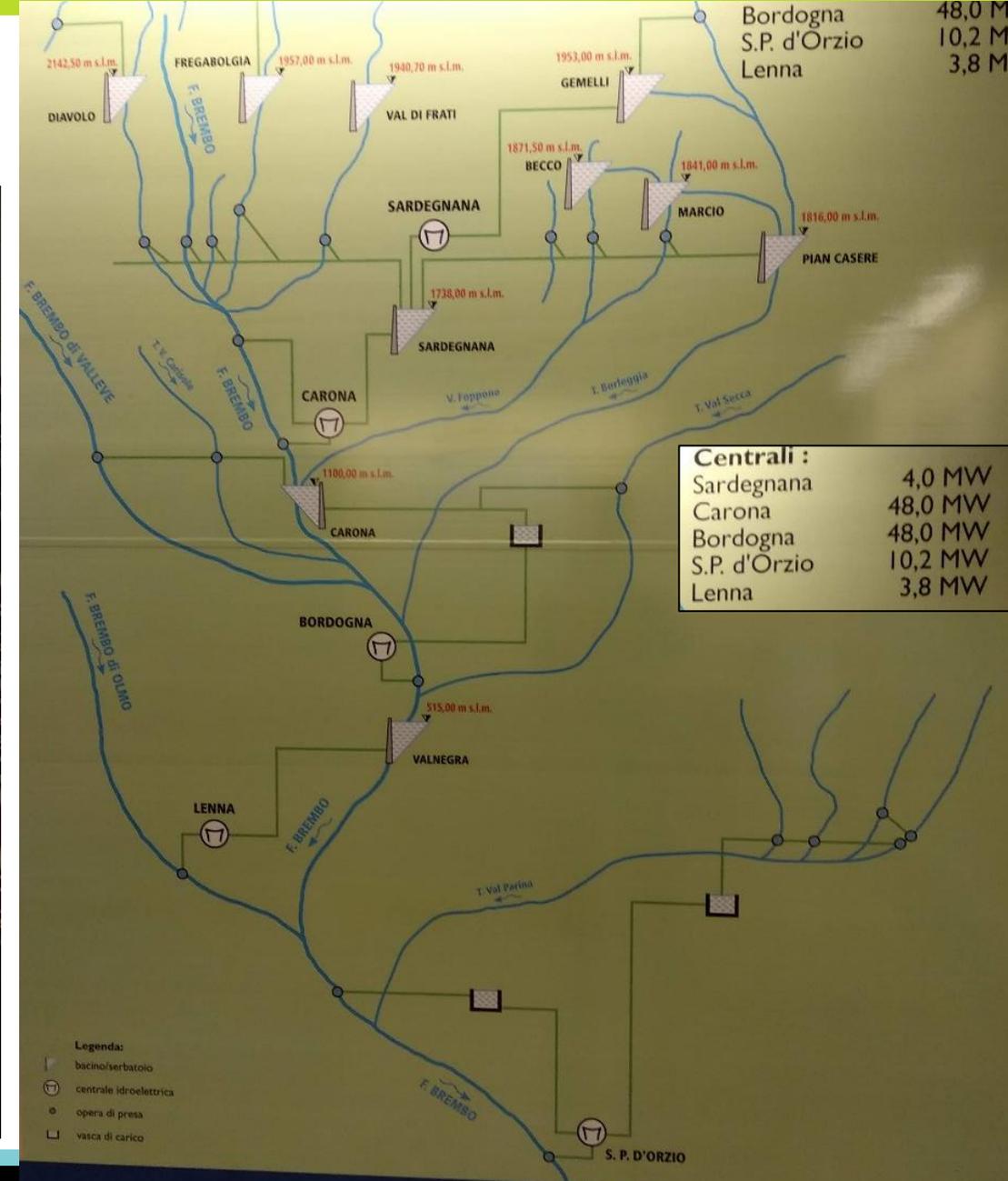
Complexe hydro-électrique de la Val Brembana de Enel Green Power



Les fonctions des barrages: Hydro-électricité

Complexe hydro-électrique de la Val Brembana de Enel

Fresque dans la salle des turbines



Les fonctions des barrages: Hydro-électricité

Complexe hydro-électrique de la Val Brembana de Enel Green Power



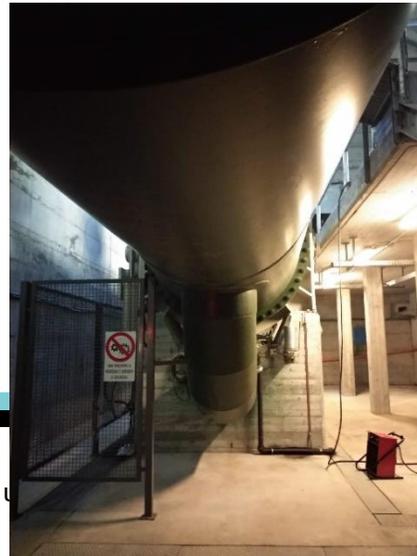
Les fonctions des barrages: Hydro-électricité

Complexe hydro-électrique de la Val Brembana de Enel Green Power

Galeries dans le barrage Sardegnana avec instruments d'auscultation



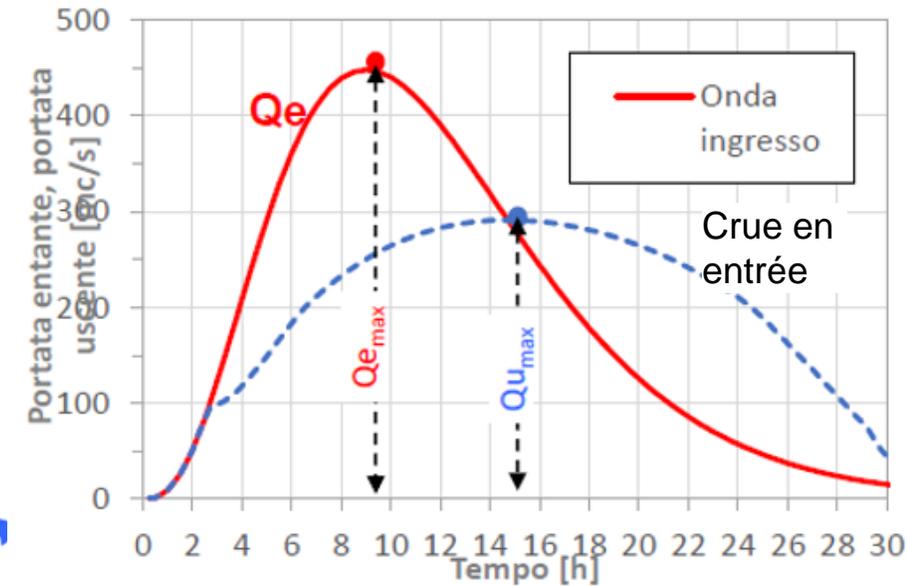
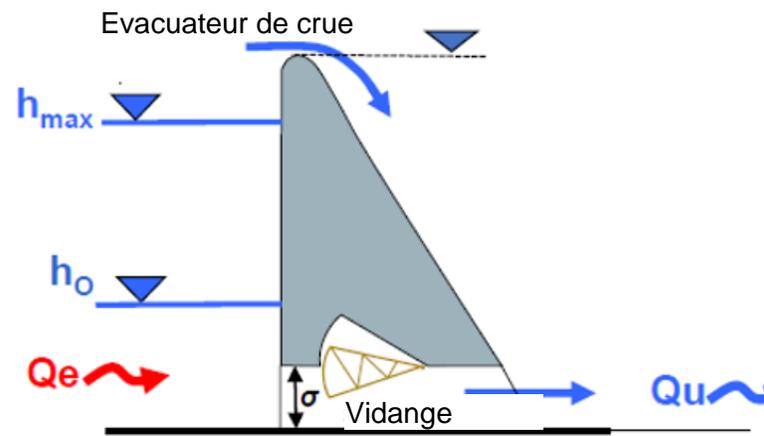
Conduite blindée entre le barrage Sardegnana et l'usine de Carona



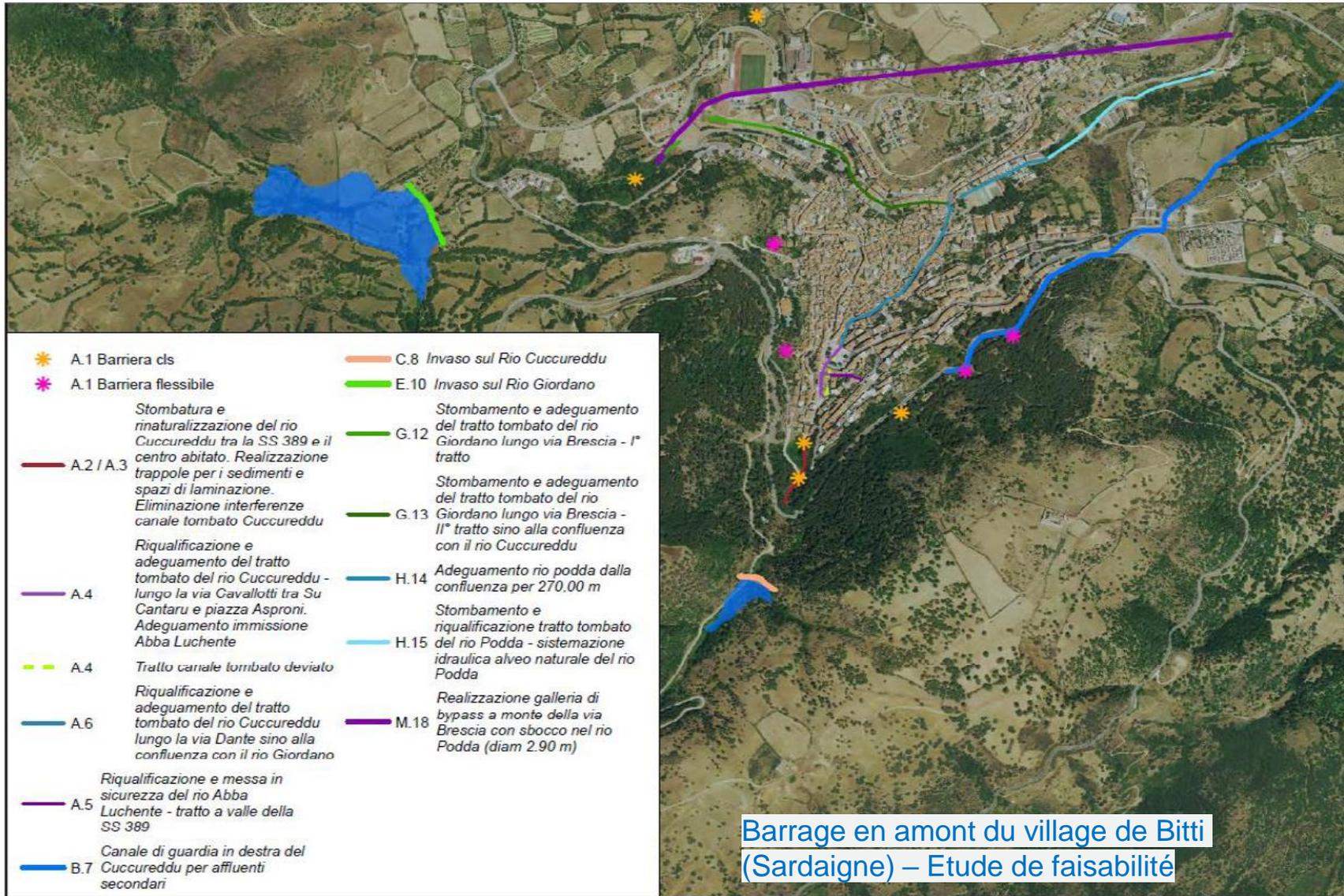
Les fonctions des barrages: **Écrêtage des crues**

Certains barrages sont conçus pour écrêter les crues, c'est à dire diminuer le débit maximum de la rivière pendant une crue. Normalement vides à l'arrivée de la crue, ils se remplissent pour empêcher l'eau de poursuivre sa course. Le volume ainsi stocké provisoirement est restitué à la rivière après le passage de la crue.

Le barrage est muni d'un pertuis ouvert situé en pied de barrage et qui limite le débit sortant pendant que le réservoir se remplit.



Les fonctions des barrages: Écrêtage des crues



Les fonctions des barrages: Écrêtage des crues

Inondations du village de Bitti 2020 (Sardaigne)



Les fonctions des barrages: **Fonction récréative, touristique, pêche,...**

Les lacs de retenues créés par les barrages constituent un attrait paysager indéniable et favorisent l'activité touristique autour et sur la retenue. Ces lacs peuvent permettre en effet le développement de la [pêche](#), du [canotage](#), de la [baignade](#) et de l'ensemble des [activités nautiques](#). Ceci apporte ainsi un développement et des retombées économiques certains à la région, qu'il s'agisse des activités elles-mêmes, de l'hébergement hôtelier ou de camping ou du commerce en général.

Par ailleurs, de très nombreux barrages ont été construits dans les dernières décennies de façon à créer des réserves d'eau destinées à la production de [neige artificielle](#); il s'agit, grâce à la neige de culture, de limiter les inconvénients des fluctuations inter-annuelles de l'enneigement naturel, de garantir les dates d'ouverture et de fermeture des stations, d'assurer la bonne skiabilité des pistes. Les barrages d'altitude permettent alors d'utiliser une réserve d'eau en période d'été hivernal.



Les fonctions des barrages: Barrages à usage multiple

De nombreux barrages sont construits pour un usage principal mais, très souvent, ils peuvent remplir plusieurs rôles et parfois simultanément. Un barrage destiné à la production hydroélectrique est aussi un lieu d'activité touristique mais il peut aussi, grâce à la grande quantité d'eau stockée, si des accords contractuels sont pris entre les administrations régionales et le gestionnaire de l'ouvrage, écrêter les crues.

La méthode la plus probante pour réguler le débit est la mise en œuvre d'un [système intégré de gestion de l'eau qui contrôle le stockage et les relâches des principaux barrages d'un bassin fluvial](#).

Règlementation italienne:

- [Laminage statique](#): Le niveau d'eau du réservoir est maintenu à une cote inférieure de façon à disposer pendant les périodes de fortes pluies d'un volume de stockage
- [Laminage dynamique](#): En cas d'alerte météo et de façon préventive, une certaine quantité d'eau est relâchée en aval de façon à libérer un certain volume du réservoir prêt à accueillir la crue.

[La définition d'un plan de laminage des crues est obligatoire](#). Il s'agit d'un accord contractuel entre le gestionnaire, les administrations régionales, la direction générale des grands barrages (DGD) et la Protection Civile.

Plan de laminage statique du Barrage Maccheronis (Sardaigne)

Mese	Quota	Volume d'invaso	Volume utile di regolazione
Ottobre	35 m s.l.m.	9.9 Mm ³	7.1 Mm ³
Novembre			
Dicembre			
Gennaio	38 m s.l.m.	15.0 Mm ³	12.2 Mm ³
Febbraio			
Marzo			
Aprile	42.3 m s.l.m.	24.9 Mm ³	22.1 Mm ³
Maggio			
Giugno			
Luglio			
Agosto			
Settembre			

Types de barrages et leur fonctionnement

Barrage poids, barrage voûtes, barrage remblais, pourquoi ces différents types? Quels sont les critères de choix?



**Les Barrages,
à la fois une
source d'énergie
et une sécurité
d'approvisionne
ment en eau**

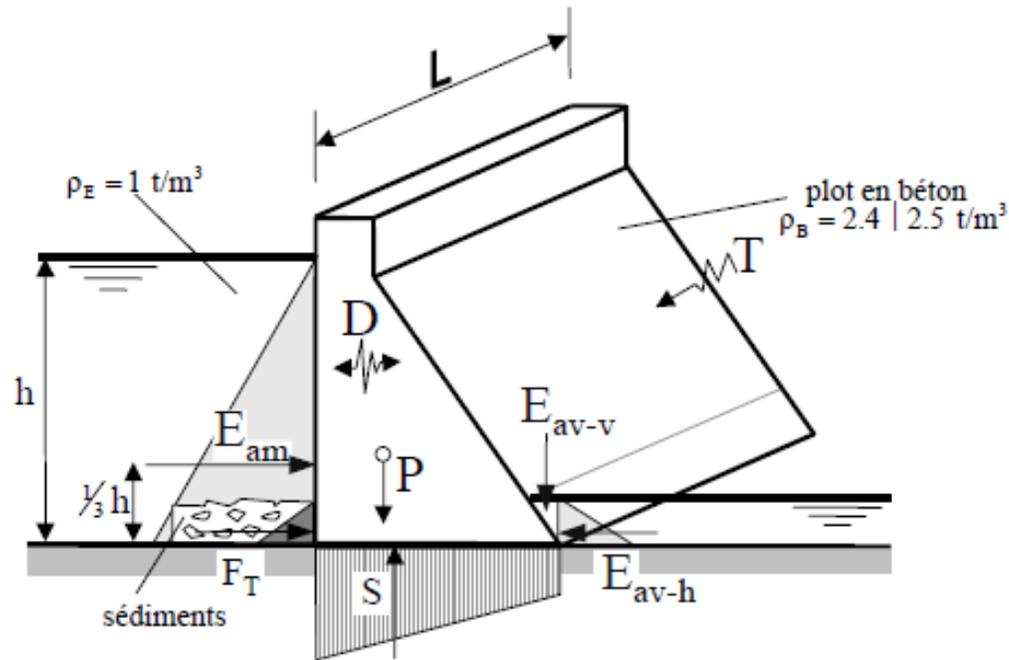
Conférence CERES
Liège, 09/05/2023

FONCTIONNEMENT D'UN BARRAGE

Barrage = Retenue d'eau étanche

Pour pouvoir retenir l'eau, le barrage doit être capable de résister à la poussée de l'eau et doit être étanche.

POUSSEE DE L'EAU: Forces et actions en jeu

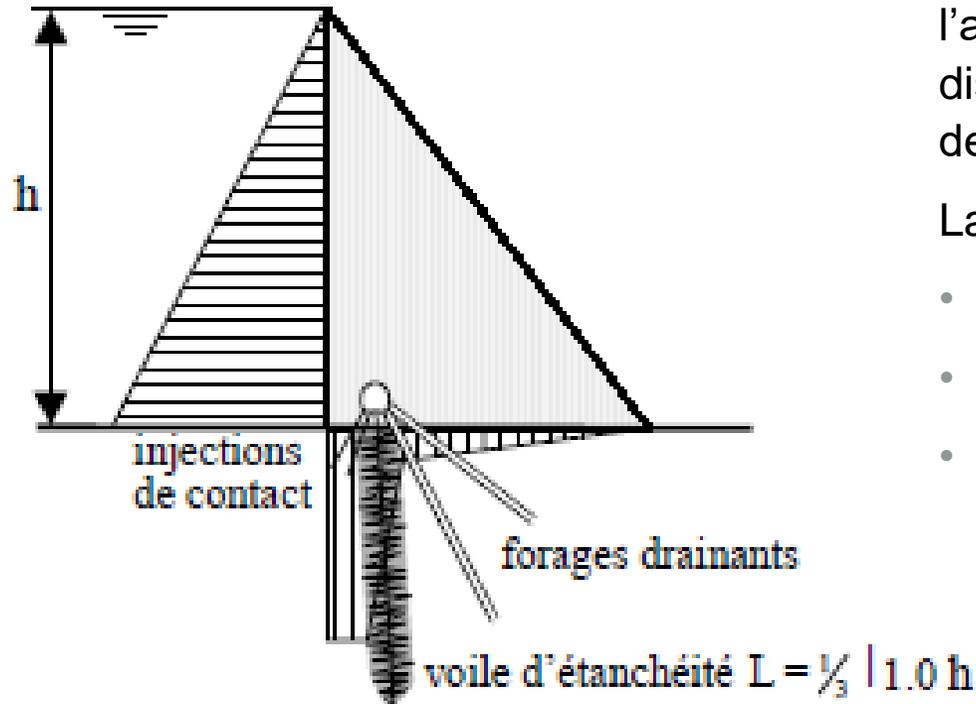


- E_{am} : poussée de l'eau en amont
- P : poids propre
- S : sous-pression de l'eau causée par l'infiltration
- F_t : poussée des terres due à la sédimentation
- E_{av} : poussée de l'eau en aval (si submersion du pied aval)
- D : Effet sismique dynamique (inerties de toutes les masses)

Fonctionnement d'un barrage

ETANCHEITE:

- Etanchéité du barrage: Béton pour les barrages en béton (barrages poids, voûte ou à contreforts), noyau central en argile pour les barrages en remblai ou bien masque amont (bitume, béton renforcé, membrane imperméable)
- Etanchéité de ces fondations: voile d'étanchéité réalisé en général par injections ou bien parois moulées, colonnes jet grouting, parois en boue bentonique



Derrière le voile d'étanchéité (qui réduit la perméabilité mais qui ne l'annule pas), il y a toujours un voile de drainage qui permet de dissiper les pressions hydrostatiques sous la fondation du barrage et de contrôler l'évolution de la filtration sous la fondation.

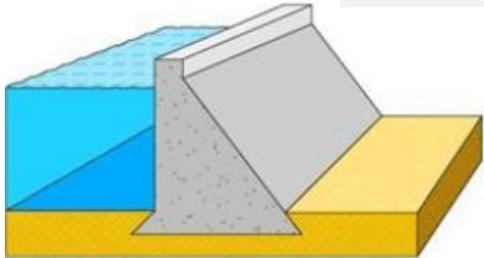
La galerie au pied amont du barrage a donc différentes fonctions:

- Recueillir l'eau qui percole dans les drains et mesurer les débits;
- Mesurer les pressions sous la fondation;
- Si les débits et les pressions mesurés sont trop importants, intervenir pour renforcer les injections et forer de nouveaux drains.

TYPES DE BARRAGES

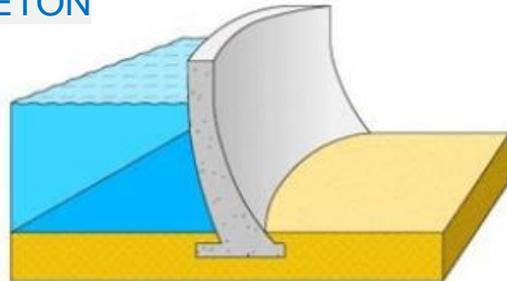
Les grandes familles de barrages:

BARRAGES BETON



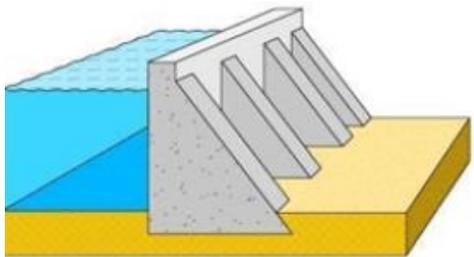
Gravity Dam

Barrage poids (14%)



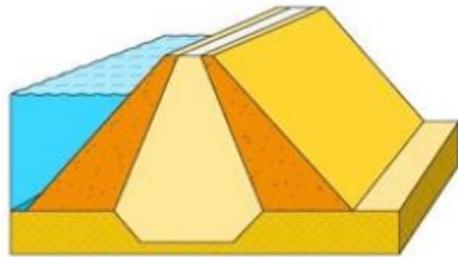
Arch Dam

Barrage voûte (4%)



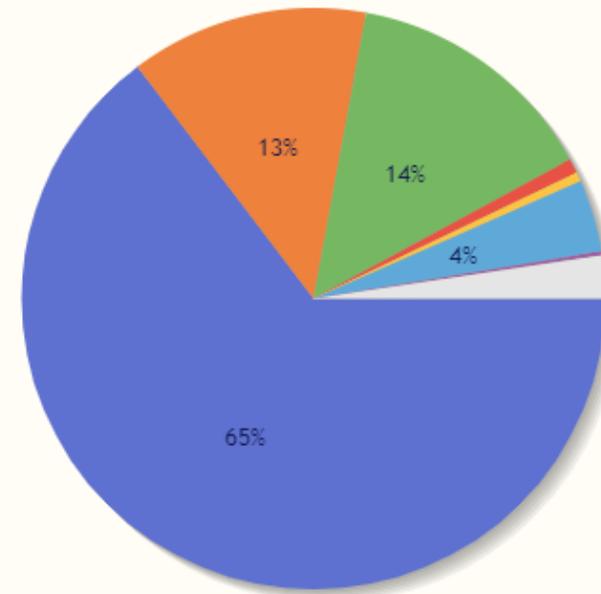
Buttress Dam

Barrage à contreforts (0,8%)

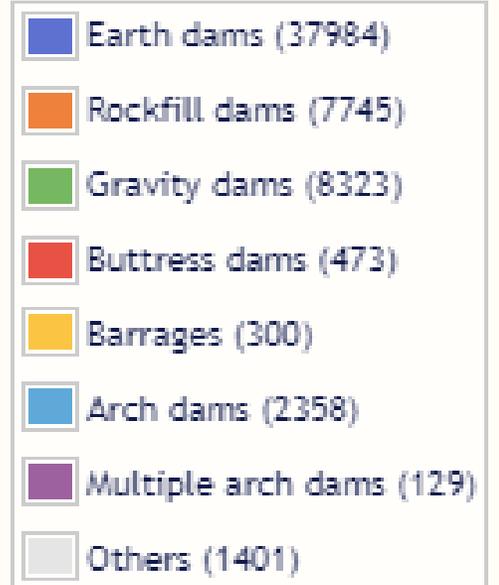


Earth Dam

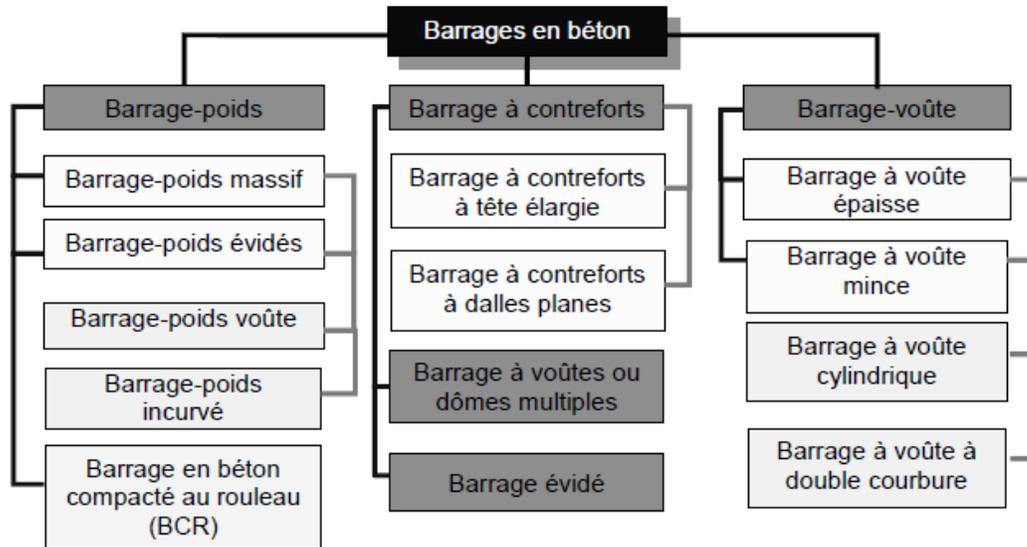
BARRAGES EN REMBLAI
(terre ou enrochement (78%))



Répartition mondiale (ICOLD)



Types de barrages: Barrages en béton

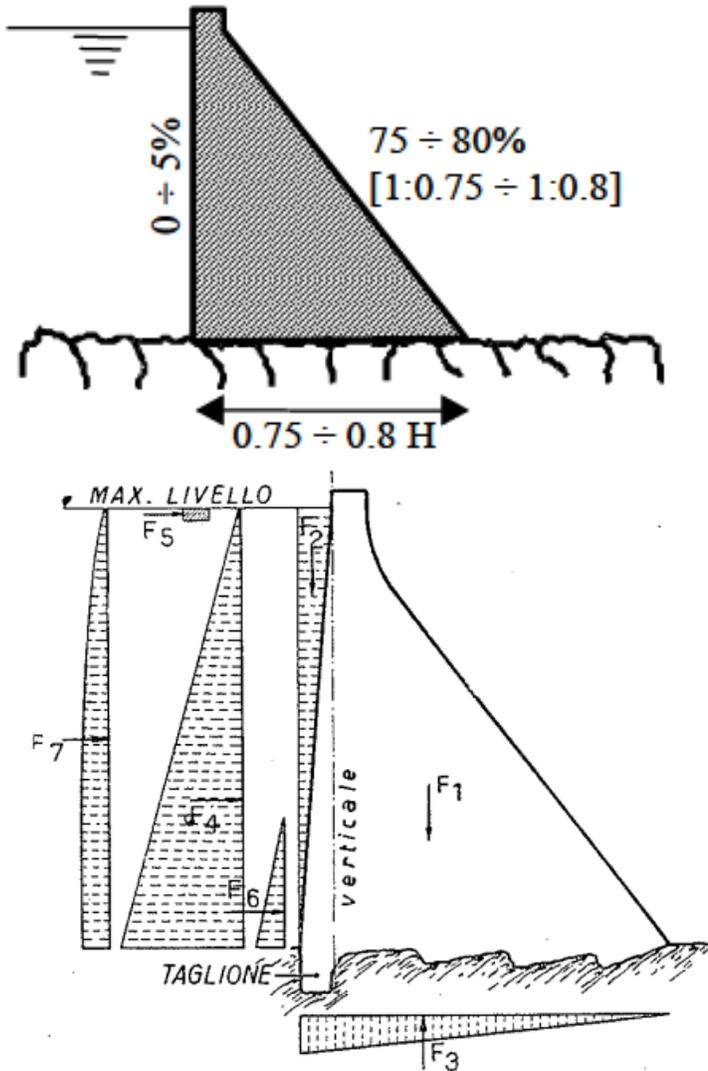


Les 3 types de barrages en béton se distinguent par leur forme, la nature de leur système statique et leur manière de s'opposer à la poussée de l'eau.

Les barrages en béton sont généralement constitués de [béton de masse, non armé](#), mis en place à une cadence élevée avec des moyens fortement mécanisés. [La géométrie est optimisée de sorte à éviter l'apparition de tractions dans le béton](#) en quelque point que ce soit de l'ouvrage.

- Le [barrage-poids](#) résiste à la poussée de l'eau par son [propre poids](#).
- Le [barrage à contreforts](#) résiste également à la poussée de l'eau par son poids propre, mais sa conception permet de diminuer le volume de béton par rapport au barrage-poids. Ce type de barrage est formé d'éléments juxtaposés, nommés [contreforts](#). Chaque contrefort est constitué d'un [masque continu à l'amont et d'une âme](#), le contrefort, qui reprend l'effort exercé par la poussée de l'eau.
- Le [barrage-voûte](#) est une structure tridimensionnelle agissant comme un voile ou une coque. Il présente une [forte courbure en plan](#) et [transmet une partie importante des efforts sur les flancs de la vallée](#).

Types de barrages: **Barrages poids**



La plupart des barrages poids sont massifs, sans vides significatifs. Le parement amont est vertical ou légèrement incliné (moins de 5%). Le parement aval est incliné avec un fruit en général de 75 à 80%. Cette géométrie lui permet de résister par son propre poids au renversement et au glissement sous l'action des forces extérieures, principalement la poussée de l'eau.

Les barrages-poids sont constitués d'une succession de plots, de 15 à 20 m de largeur. Ces blocs sont séparés par des joints (1 à 3 mm) qui sont libres de s'ouvrir ou de se fermer selon les conditions. Ces joints de dilatation sont en fait les joints de retrait qui s'ouvrent lors du refroidissement du béton ou lors des saisons froides. Ces joints sont munis d'un système d'étanchéité à l'amont (par exemple bandes waterstop).

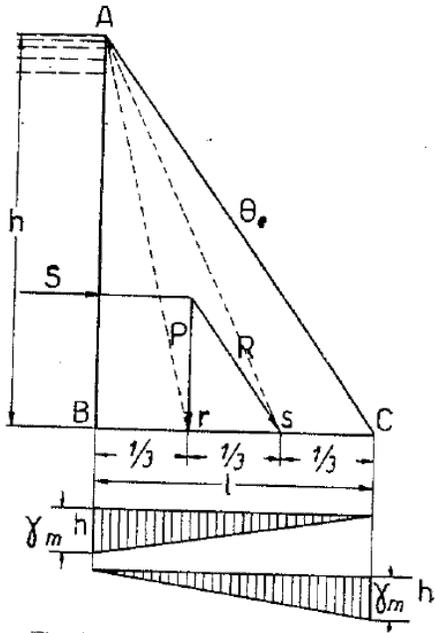
Trois principes fondamentaux gouvernent la statique des barrages-poids :

- Le poids propre s'oppose à la poussée de l'eau par le frottement résultant sur la fondation,
- Chaque bloc est stable par lui-même; aucun effet de voûte tridimensionnel ne participe à la stabilité,
- Le béton de barrage, non armé, ne supporte aucune contrainte de traction.

Types de barrages: Barrages poids – Equilibre statique fondamental

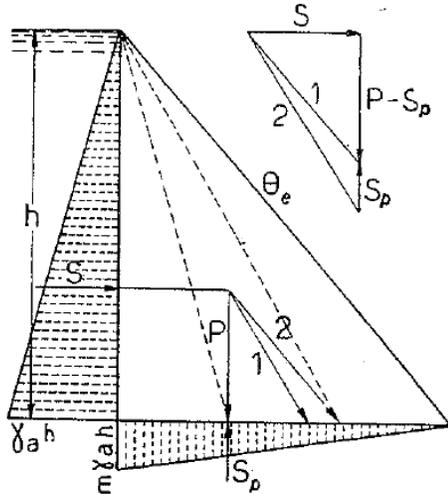
Equilibre du triangle fondamental: Dimensionnement basé sur le principe de l'absence de traction le long du parement amont en condition statique.

$$\frac{l}{h} = \theta_s = \sqrt{\frac{\gamma_a}{\gamma_m}}$$



Sans sous-pression

$$\theta_s = \sqrt{\frac{\gamma_a}{\gamma_m - m \gamma_a}}$$



Avec sous-pression

m: coefficient de réduction de la pression

m=1 sous-pression complète

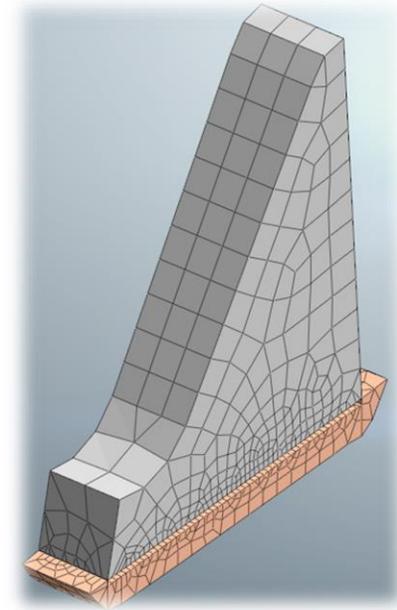
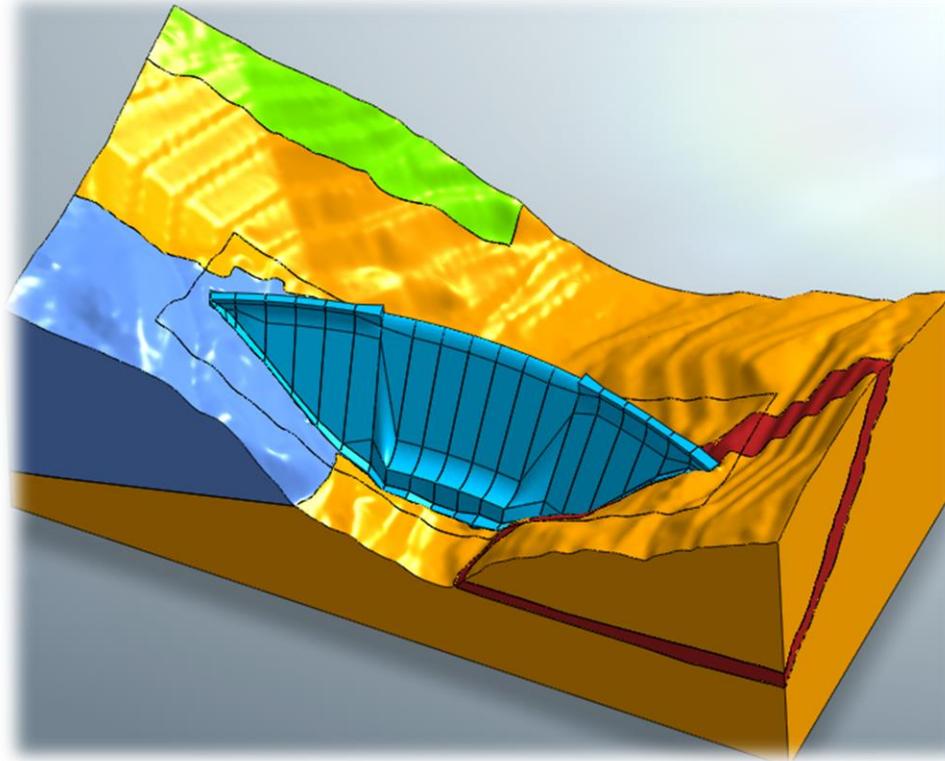
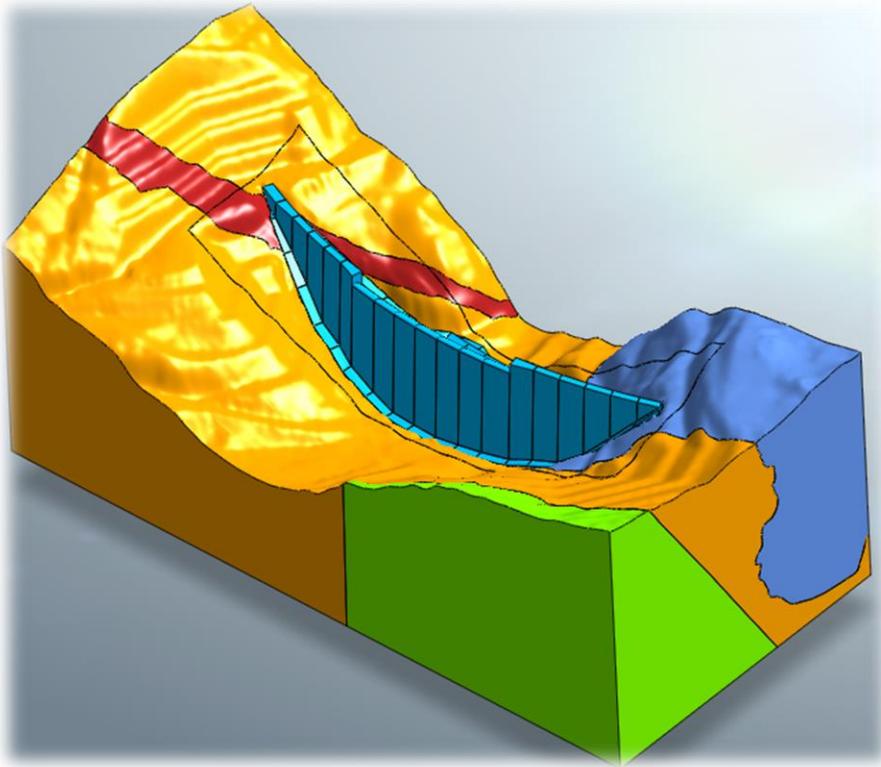
m=0 sous-pression absente

VALORI DELLA SCARPA θ_s PER DIVERSI VALORI DEL COEFFICIENTE m E DEL PESO SPECIFICO γ_m

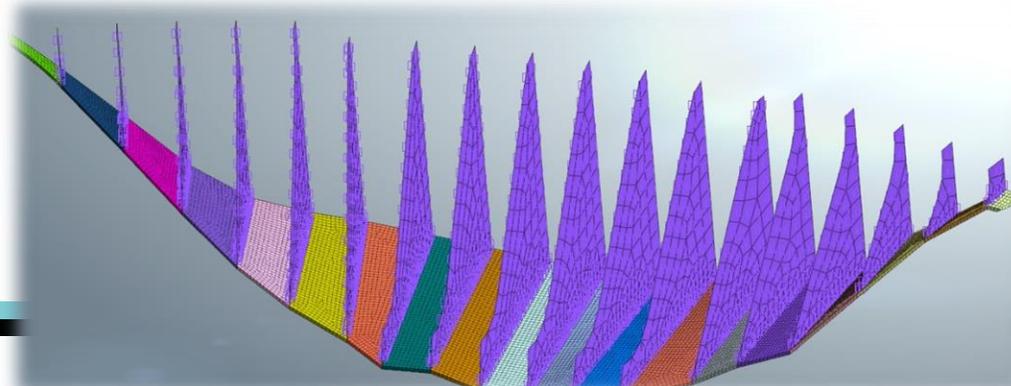
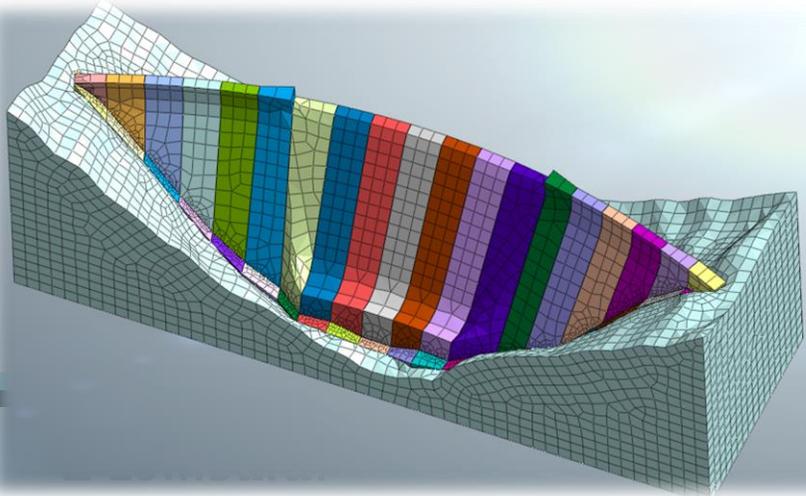
Valori di γ_m	Valori del coefficiente m				
	0	1/2	2/3	3/4	1,0
2,20	0,674	0,767	0,808	0,830	0,913
2,25	0,667	0,756	0,795	0,816	0,894
2,30	0,660	0,745	0,783	0,803	0,877
2,35	0,652	0,735	0,771	0,791	0,861
2,40	0,646	0,725	0,760	0,778	0,845
2,45	0,639	0,716	0,749	0,767	0,830
2,50	0,632	0,707	0,740	0,756	0,816

Types de barrages: Barrages poids

Modèle Eléments Finis Midas GTS 3D

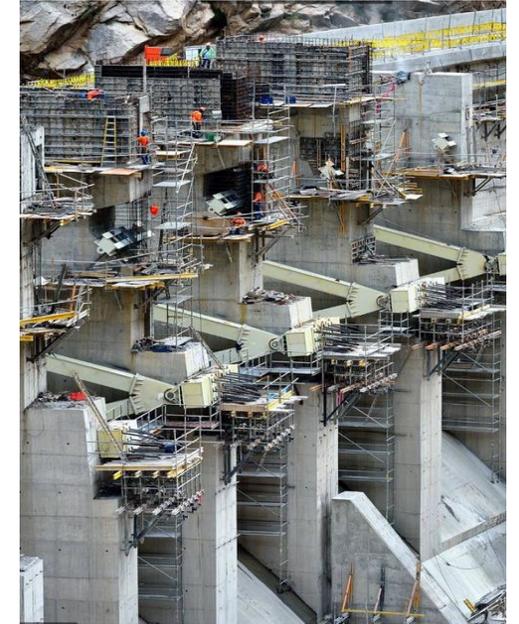
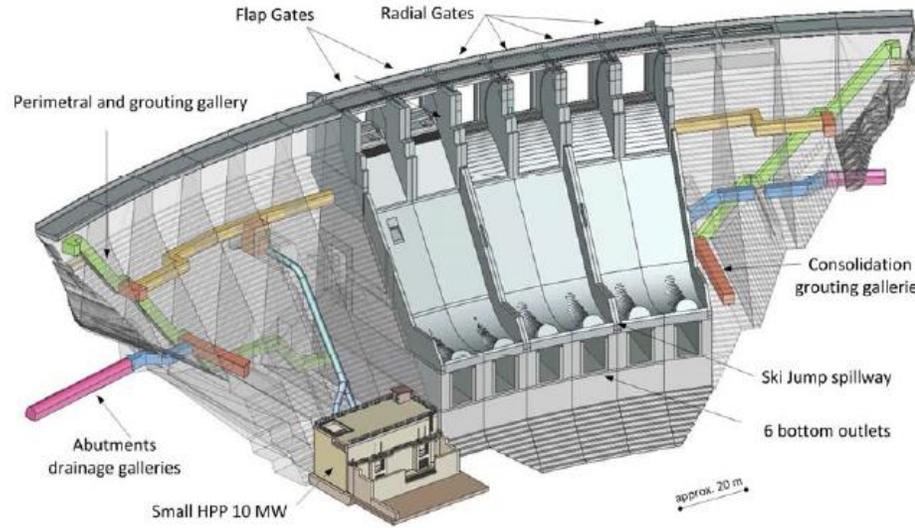


Barrage poids de Cumbidanovu (Sardaigne) H=73m

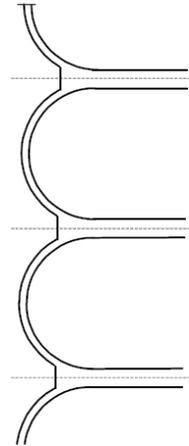
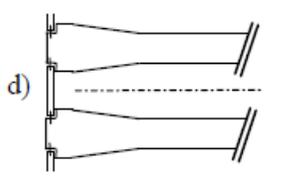
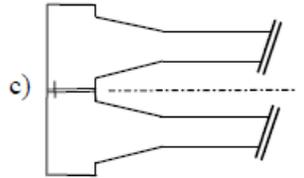
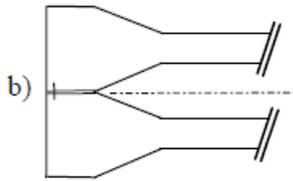
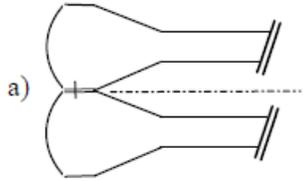
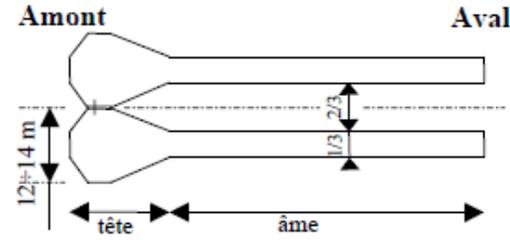
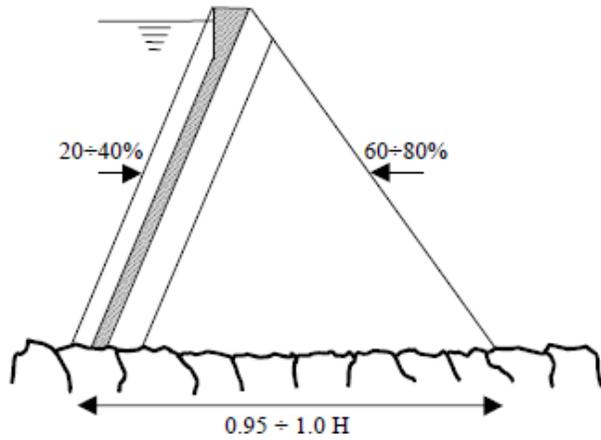


Types de barrages: Barrages poids en BCR (béton roulé compacté)

Barrage poids de Cerro del Aguila (Pérou) H=88m



Types de barrages: Barrages à contreforts



Formes de la tête des contreforts - différentes solutions

- a) à tête ronde
- b) à tête en forme de marteau
- c) à tête en forme de T
- d) à dalles planes.

Barrage à voûtes multiples

Le barrage à contreforts nécessite un volume de béton inférieur au barrage poids. Par contre, la surface de coffrage est plus importante, ainsi que la difficulté de mise en place du coffrage.

Du fait de son poids réduit, le parement amont doit être incliné de façon à profiter de la composante verticale de la poussée de l'eau.

Comme dans le cas des barrages-poids, les contreforts sont construits côte à côte et sont séparés par un joint vertical doté d'une bande d'étanchéité à l'amont.

Les barrages à contreforts sont particulièrement vulnérables au séisme.

Types de barrages: Barrages à contreforts



Barrage à voûtes multiples du Gleno (Alpes) H=52m

Barrage construit en 1923 dans les Alpes.

Rupture de la partie centrale lors de la fin du 1^{er} remplissage (356 morts).



Les types de barrages: Barrages voûtes

Dam type – From arch to gravity dam

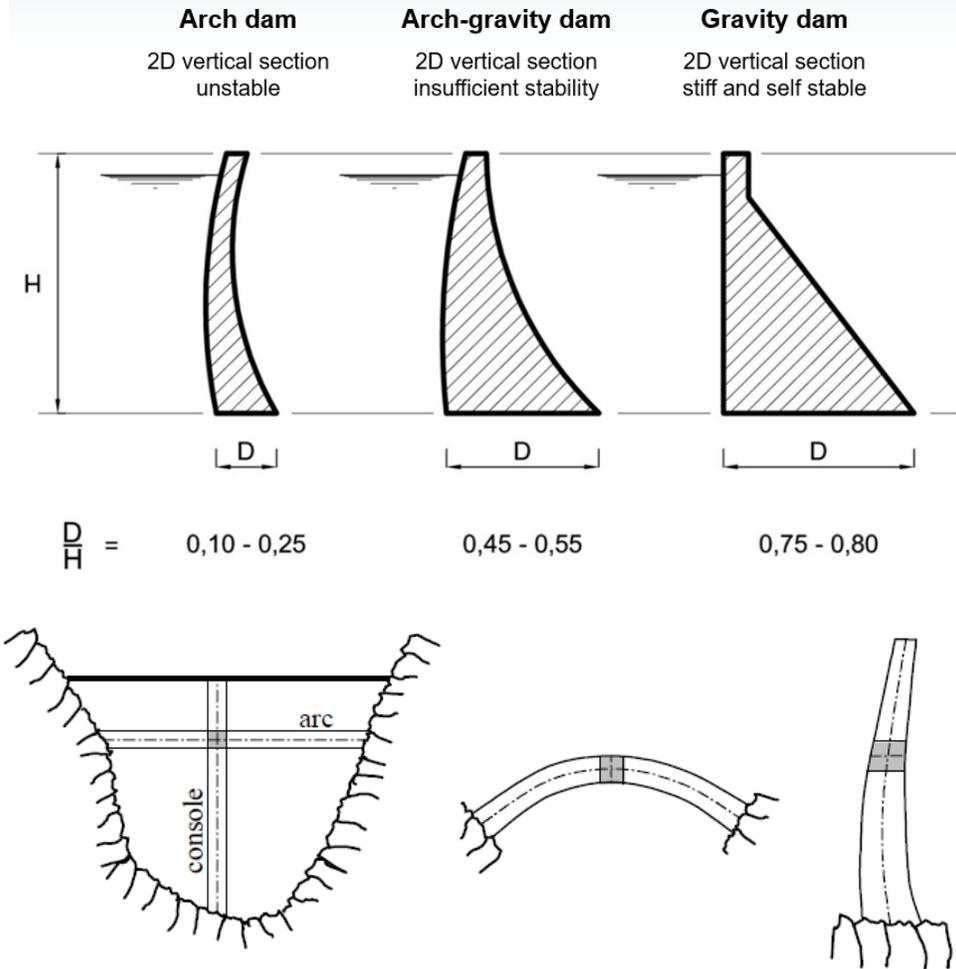


Figure 1.15: Barrages-voûtes : modèle statique simplifié

Le barrage voûte est incurvé en plan. Du fait de sa courbure, une part importante des efforts dus à la poussée de l'eau est transmise aux flancs de la vallée.

Pour illustrer cet effet tridimensionnel, on peut modéliser le barrage voûte par une série d'éléments porteurs horizontaux et verticaux:

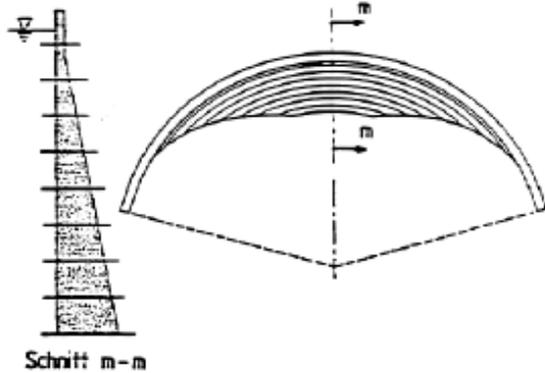
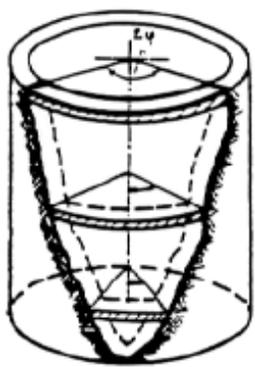
- Les éléments porteurs horizontaux sont des poutres courbes à 2 appuis, les arcs.
- Les éléments porteurs verticaux sont des poutres consoles.

Dans un tel modèle très simplifié, la poussée de l'eau appliquée au point d'intersection de 2 éléments se répartit selon le rapport de leurs rigidités respectives. Les arcs sont des éléments évidemment beaucoup plus rigides que les consoles (de par leur hyperstaticité); les efforts dus à la poussée de l'eau sont par conséquent guidés de manière préférentielle vers les flancs de la vallée.

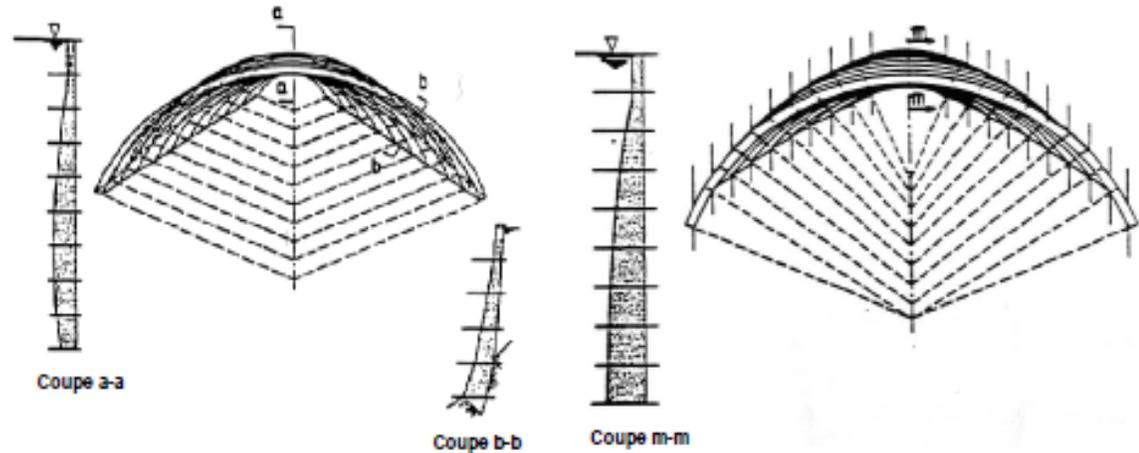
Plus la voûte est mince, plus le rapport des rigidités tend à diriger les efforts vers les flancs de la vallée.

Types de barrages: Barrages voûtes

On distingue les barrages voûtes cylindriques (à courbure horizontale seulement, simple courbure) et les barrages voûtes à double courbure (horizontale et verticale).

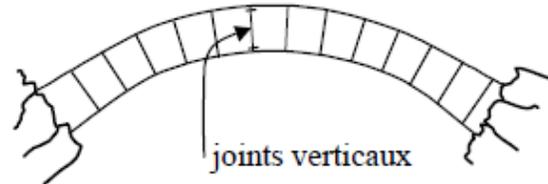
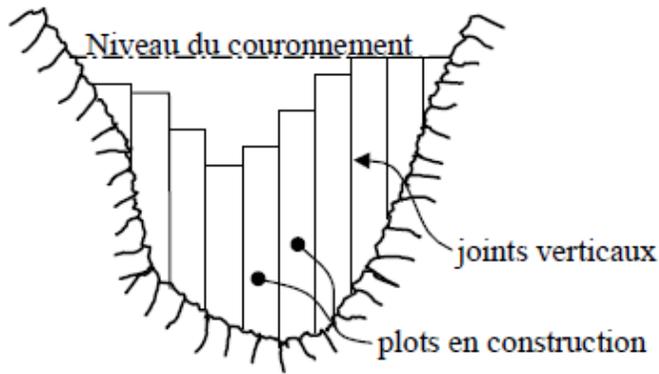


Principe de la voûte à simple courbure



à gauche : barrage à angle d'ouverture constant
à droite : barrage à rayon et à angle d'ouverture variable

Types de barrages: Barrages voûtes



Comme le barrage poids, le barrage voûte est construit en plots juxtaposés, mais une différence constructive essentielle les distingue : alors que les joints séparant les plots du barrage poids sont ouverts, les joints d'un barrage voûte sont injectés avec du lait de ciment pour rendre la voûte monolithique (clavage de la voûte) et assurer la transmission des efforts horizontaux jusqu'aux rives.

A priori, le barrage voûte nécessite la mise en place de sensiblement moins de béton que le barrage-poids. Le matériau est également beaucoup mieux utilisé.

De par son système statique, le barrage voûte sollicite de manière importante la fondation sur les flancs de la vallée. Ceux-ci doivent être résistants et peu déformables.

Alors que les barrages poids peuvent s'adapter à n'importe quelle forme et n'importe quelle largeur de vallée, le barrage voûte ne peut se concevoir que dans des vallées relativement étroites.

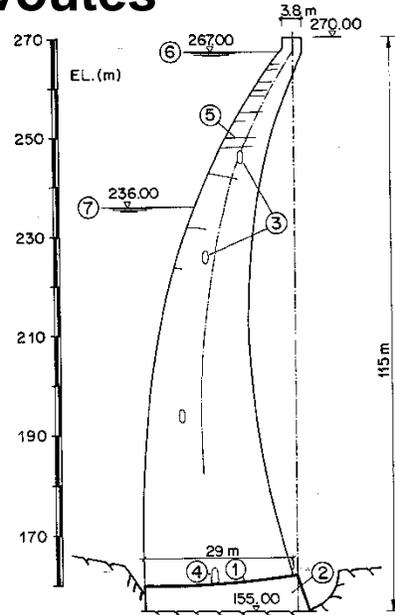
On définit l'élançement d'un barrage :
$$\lambda = \frac{\text{longueur développée du couronnement}}{\text{hauteur du barrage}}$$

En règle générale, l'élançement ne doit pas dépasser 4 à 5 (exceptionnellement 6).

Types de barrages: Barrages voûtes



Barrage Flumendosa (Sardaigne) H=110m



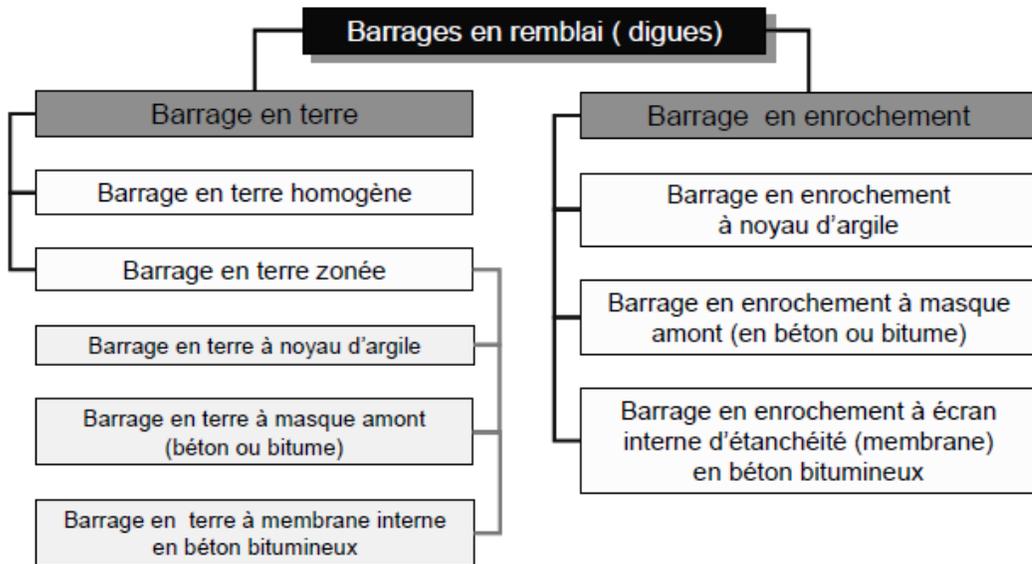
Barrage Pian Telesio (Alpes) H=80m



Barrage de Zeuzier (Valais) H=156m



Types de barrages: **Barrages en remblai**

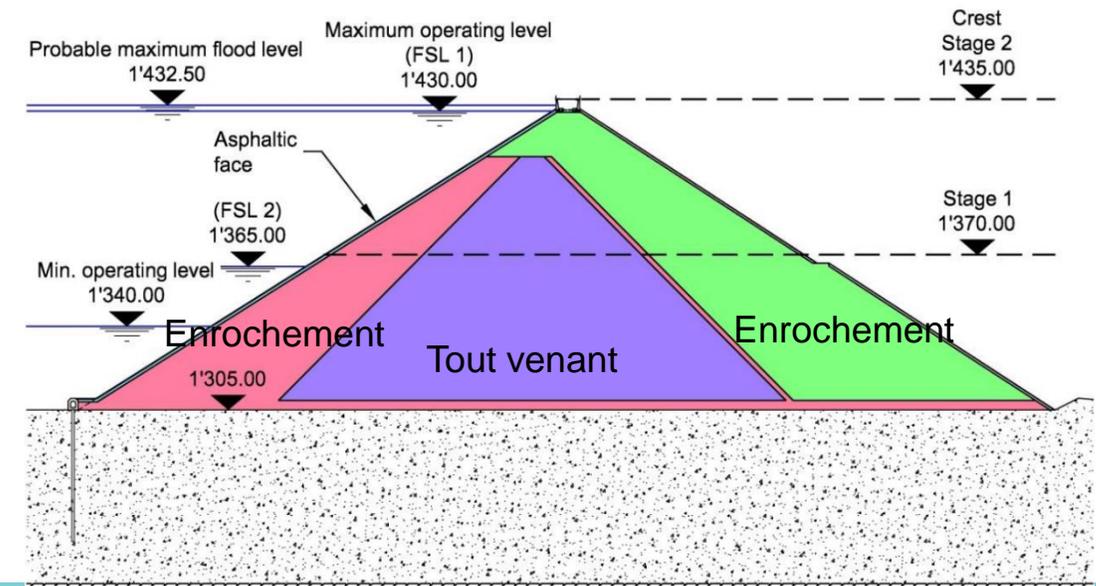


Les barrages zonés sont constitués de plusieurs matériaux répartis par zones dans le corps du barrage. La partie centrale, qui nécessite des caractéristiques de résistance mécanique inférieure, peut être composée par des terres, les zones sur les flancs en revanche par de l'enrochement. Le fait d'utiliser de l'enrochement pour les flancs permet d'adopter des pentes moins douces pour les parements et donc de réduire le volume de matériaux.

Les barrages en remblai sont constitués essentiellement de matériaux granulaires naturels meubles prélevés à proximité immédiate de l'ouvrage.

2 catégories de barrages en remblai :

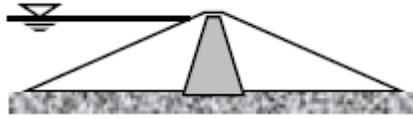
- Les barrages en terre, réalisés essentiellement à partir de sols naturels meubles prélevés dans des gravières;
- Les barrages en enrochement, dont la majeure partie est constituée de matériau de carrière concassé.



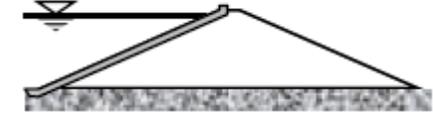
Types de barrages: Barrages en remblai

ETANCHEITE DES BARRAGES EN REMBLAI:

Noyau en argile

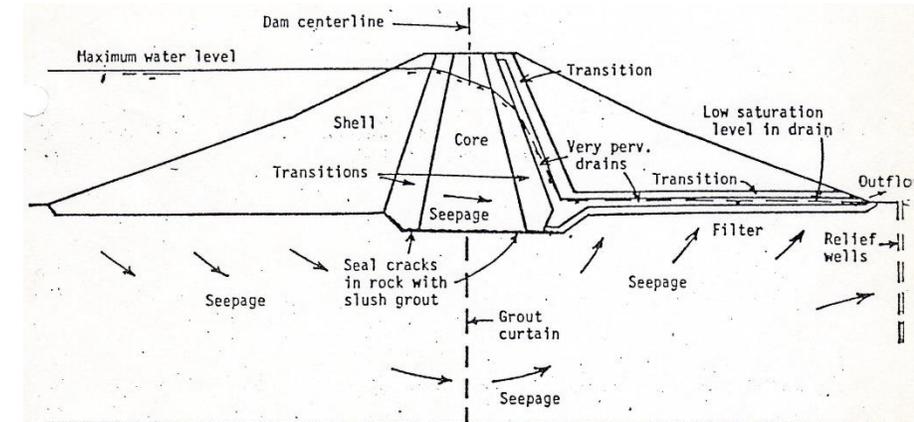


Masque amont (bitume ou béton)



DIMENSIONNEMENT GEOTECHNIQUE:

- Stabilité statique et dynamique ([sécurité au glissement](#)) des parements amont et aval (fin de construction, exploitation, vidange rapide, tremblement de terre)
- Calcul des [filtrations](#) en fondation et à l'intérieur du remblai, mesure pour la limitation des gradients hydrauliques
- Dimensionnement de la granulométrie des couches de [drains](#) et de [filtres](#) pour éviter les phénomènes d'érosion interne par entrainement des particules fines
- Evaluation du potentiel de [liquéfaction](#) des terrains de fondation
- Détermination des conditions optimales ([teneur en eau](#)) pour le compactage de l'argile
- Vérification des [tassements](#) pendant la construction, lors du remplissage et en service (consolidation)



Types de barrages: Barrages en remblai

Par rapport aux barrages en béton, les barrages en remblai présentent les avantages suivants :

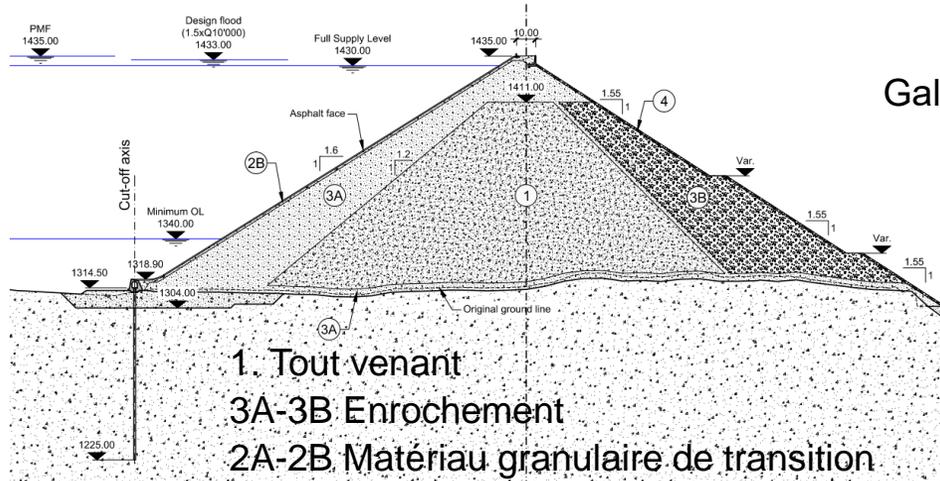
- La grande majorité, voire la totalité des matériaux constituant le corps du barrage [provient de la proximité immédiate du site](#) ;
- La mise en œuvre des matériaux peut être [très fortement mécanisée](#) et les cadences très importantes, même si le volume à mettre en place est beaucoup plus important;
- La [sollicitation de la fondation \(contraintes\) est beaucoup plus faible](#) ;
- Les tassements de fondation ne posent pas de difficultés majeures, les matériaux étant suffisamment plastiques pour s'adapter. Ils peuvent donc être placés aussi bien sur une fondation rocheuse que sur une [fondation en terrain meuble](#).

Les principaux inconvénients sont les suivants:

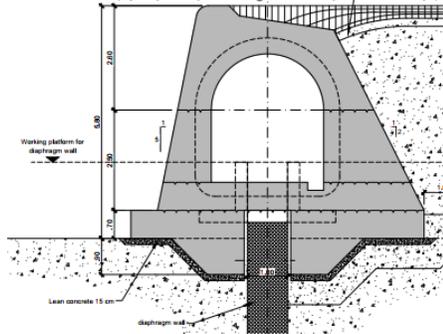
- Le [débordement avec entrainement des matériaux](#) conduit à des dégâts considérables
- La [filtration](#) et les [pressions interstitielles](#) doivent être correctement mesurées et surveillées.

Les types de barrages: Barrages en remblai

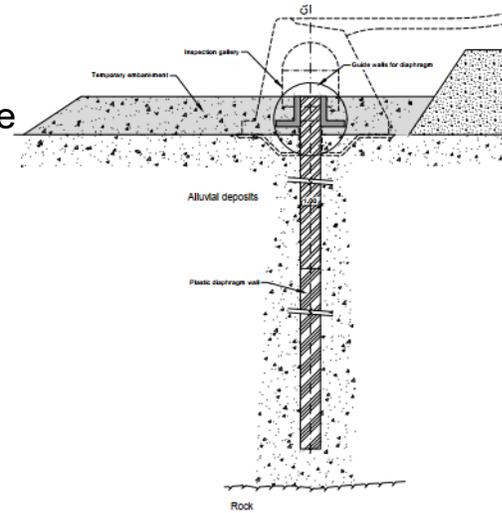
Barrage zoné avec masque en bitume Nenskra (Géorgie) H=125m



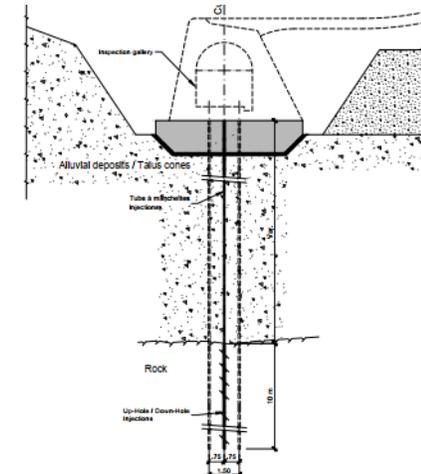
Galerie d'inspection et de drainage



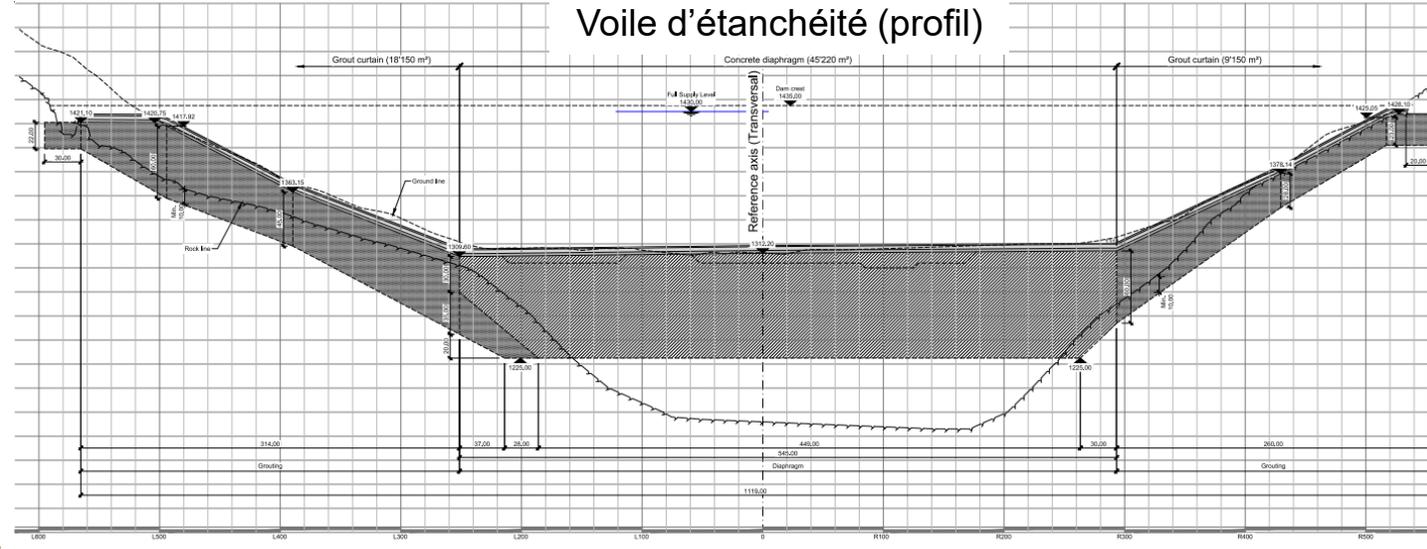
Voile d'étanchéité
Paroi moulée en béton



Injection



Voile d'étanchéité (profil)

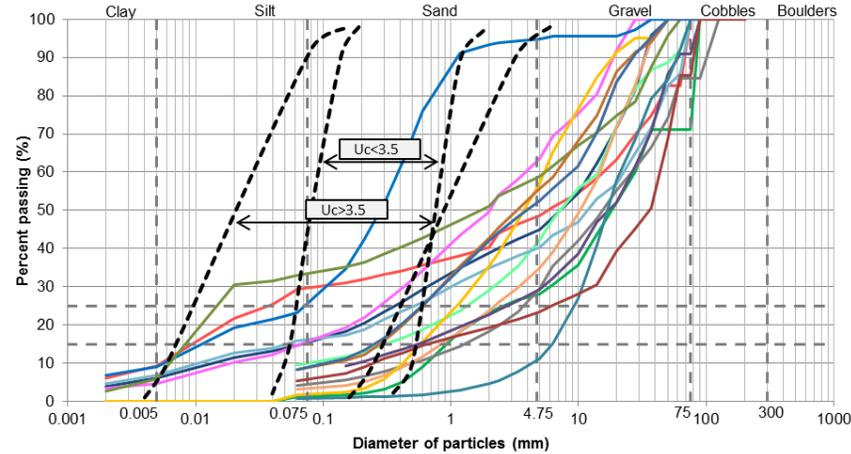
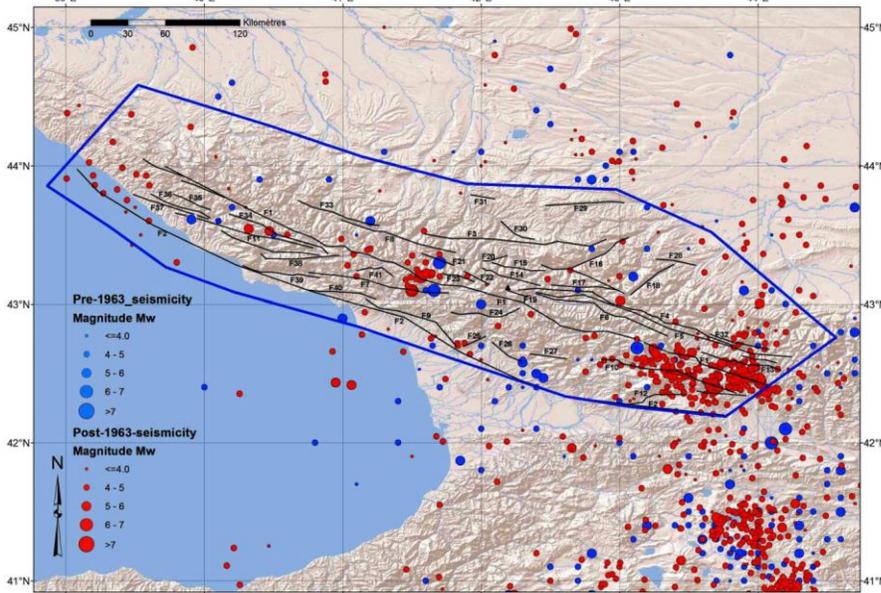


Types de barrages: Barrages en remblai

Barrage zoné avec masque en bitume Nenskra (Géorgie) H=125m

Carte des TdT et failles

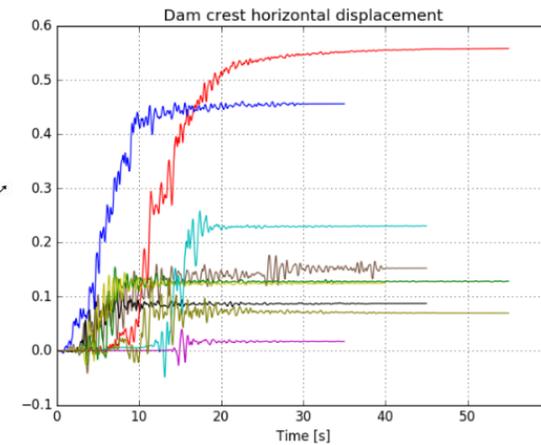
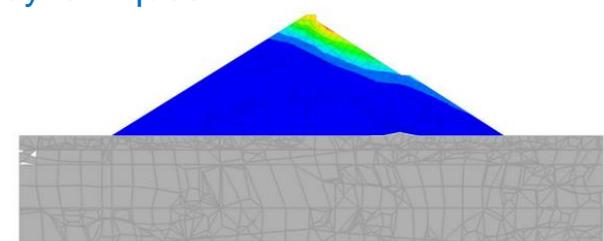
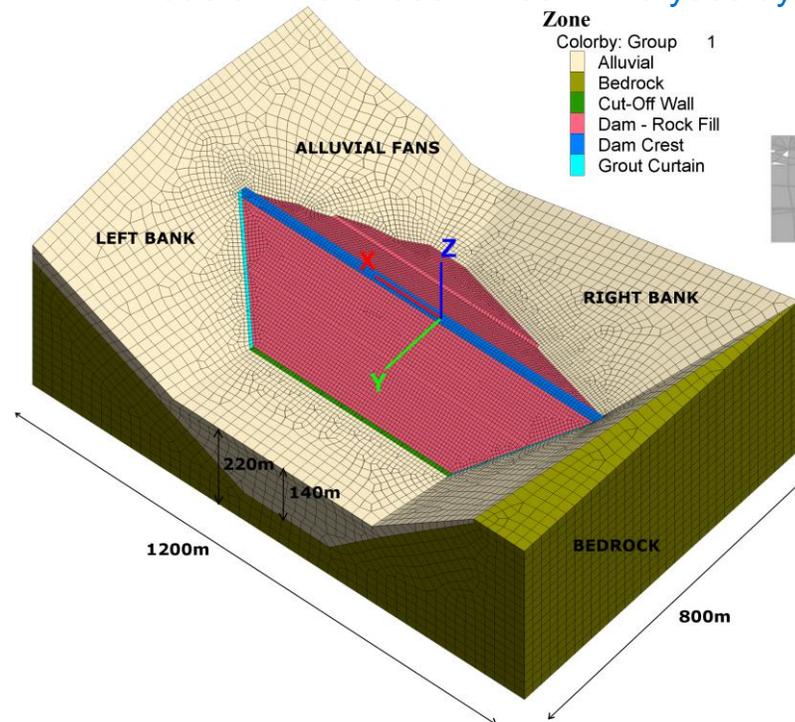
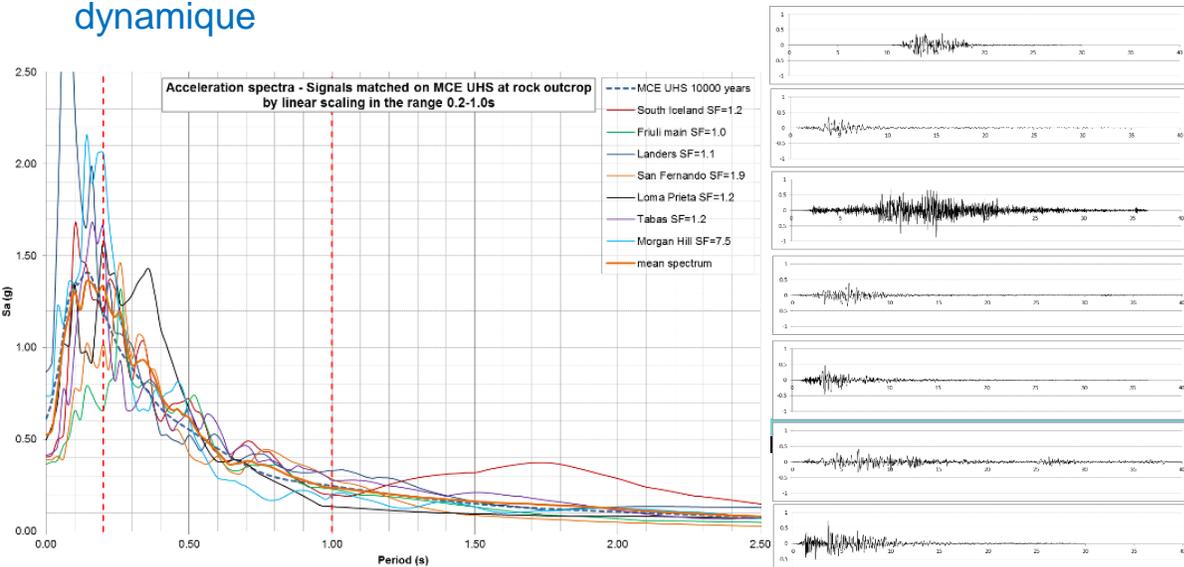
Granulométrie des terrains de fondation – Potentiel de liquéfaction



Accélérogrammes et spectres pour modélisation numérique dynamique

Modèle Différences Finies – Analyses dynamiques

x=100



Composantes d'un barrage et de son aménagement: Evacuateur de crue, vidange de fond et prise d'eau

Quels sont les organes qui permettent de contrôler les niveaux du réservoir?



**Les Barrages,
à la fois une
source d'énergie
et une sécurité
d'approvisionne
ment en eau**

Conférence CERES
Liège, 09/05/2023

 **Lombardi**

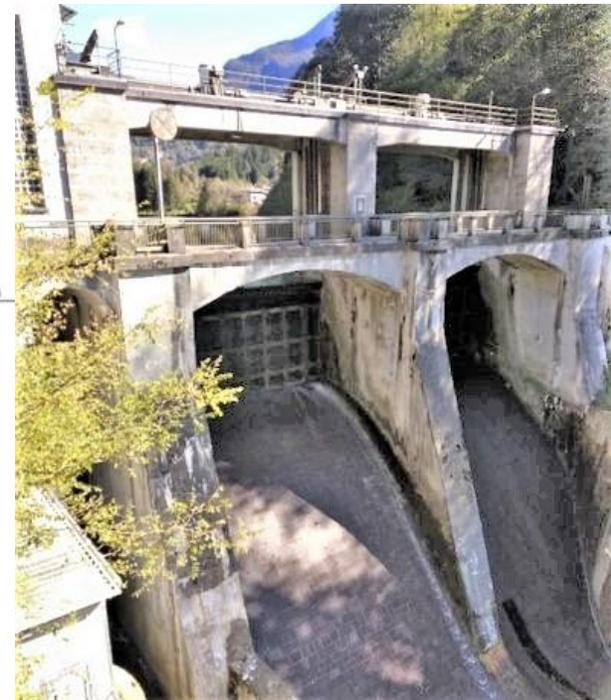
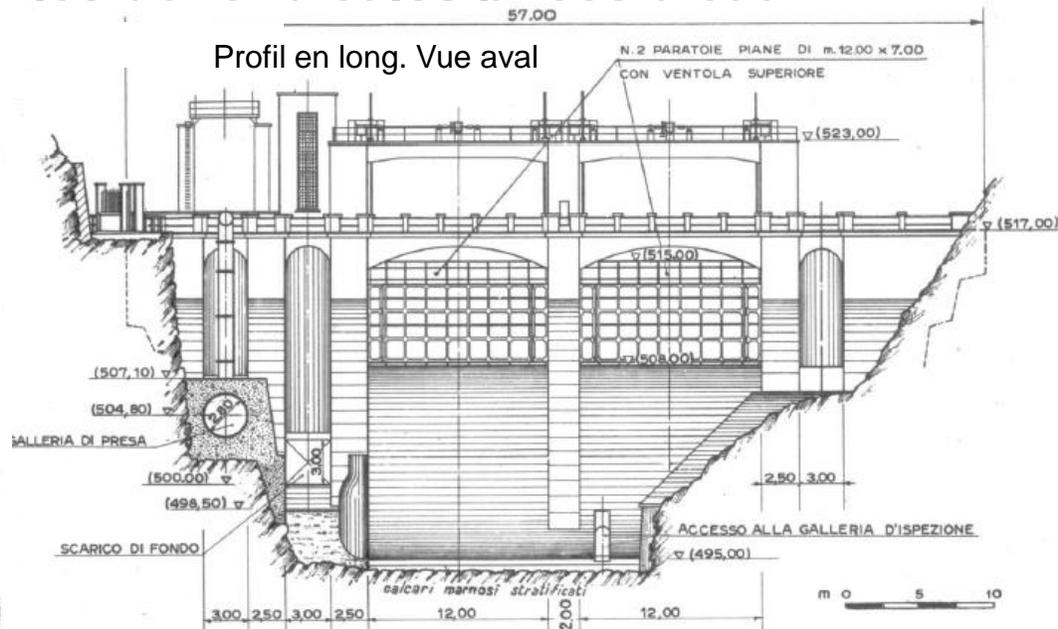
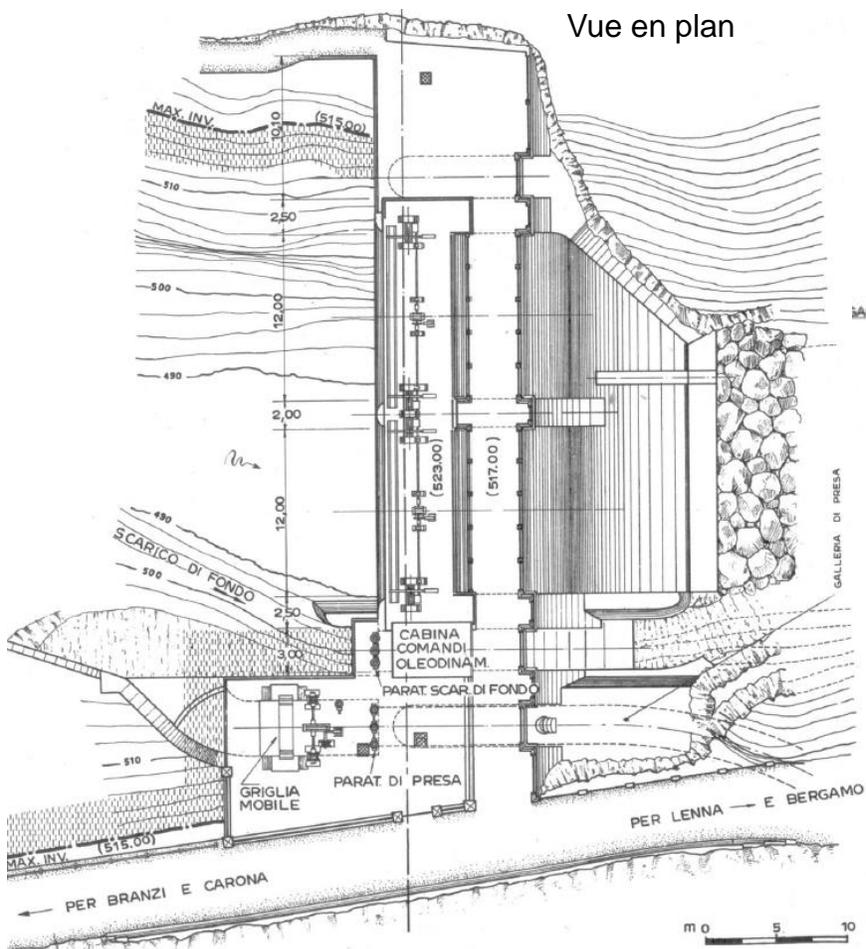
Cécile Crémer

L'évacuateur de crue, les vidanges de fond et les prises d'eau

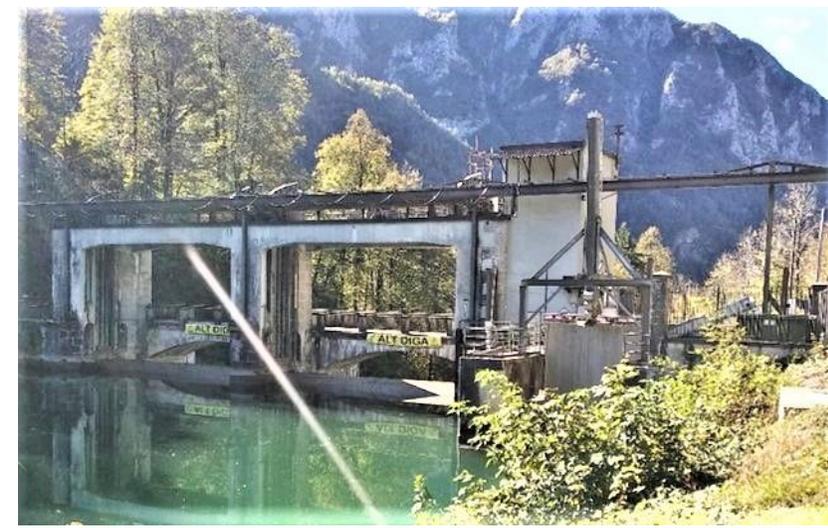
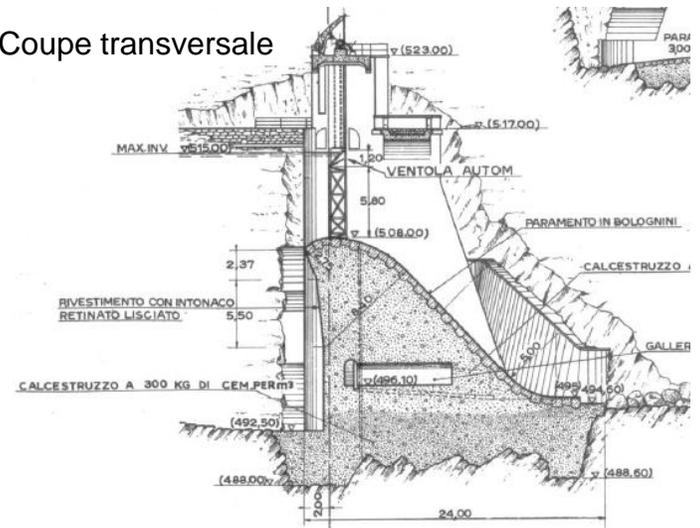
- **Evacuateur des crues**: organe de sécurité qui permet d'éviter le débordement non contrôlé d'une retenue; il est dimensionné pour permettre l'évacuation des crues millénales:
 - Evacuation avec ou sans vanne,
 - En entrée: déversoir à l'air libre sur le barrage ou latéral (Creager, labyrinthe, PK weir), en galerie avec seuil latéral ou circulaire alla morning glory (tulipe)
 - En sortie: ouvrage de dissipation (ski jump, bassin amortisseur)
- **Vidanges de fond**:
 - Vidange complète du bassin pour effectuer des purges ou permettre la maintenance;
 - Abaissement du plan d'eau en période de dangers (crue exceptionnelle);
 - Evacuation de dépôts de sédiments pour autant que cette pratique soit autorisée;
- **Prise d'eau**: Prélèvement de l'eau dans la retenue en vue de son utilisation (turbinage, irrigation, eau potable et industrielle).

L'évacuateur de crue, les vidances de fond et les prises d'eau

Barrage poids Valnegra (Alpes) H=29m



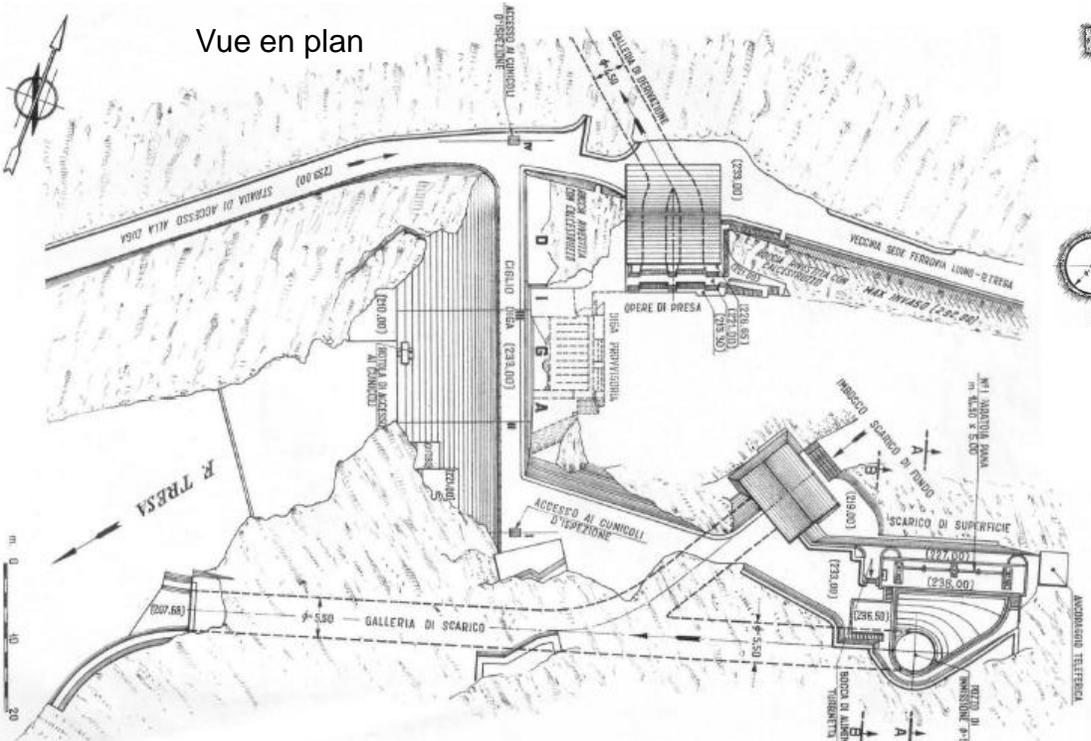
Coupe transversale



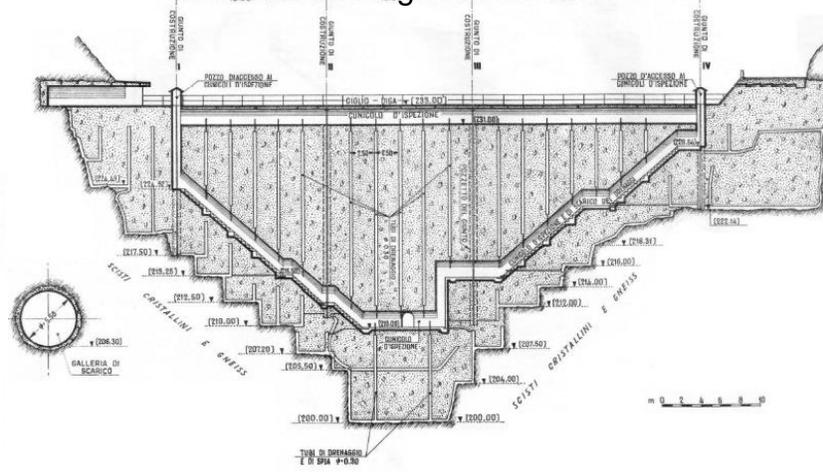
L'évacuateur de crue, les vidanges de fond et les prises d'eau

Barrage poids Creva (Lombardie) H=33m

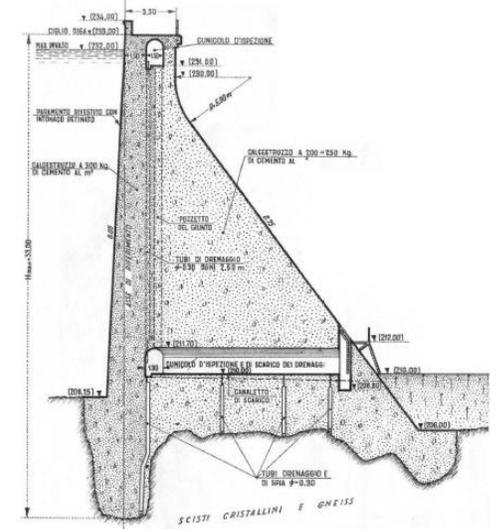
Vue en plan



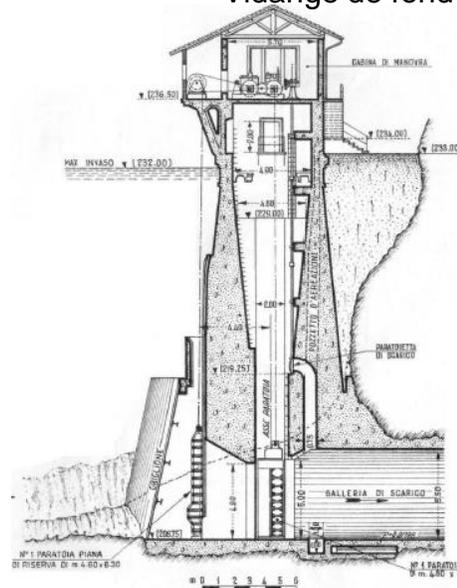
Profil en long. Vue amont



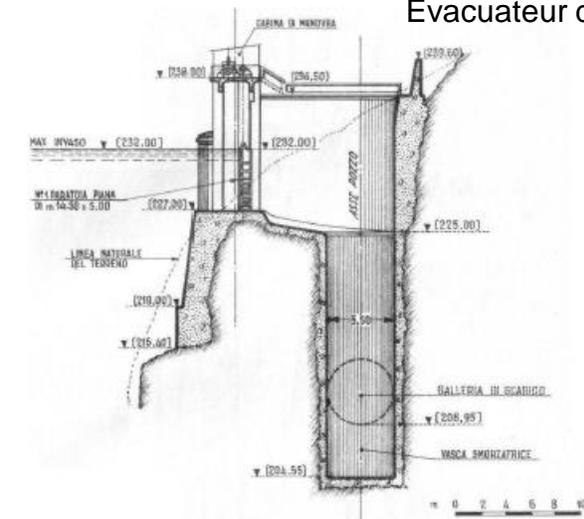
Coupe transversale



Vidange de fond



Evacuateur de crue



L'évacuateur de crue

Creager central



Evacuateur latéral (Barrage de Oroville)



Labyrinthe



Piano Key Weir



Morning Glory (Tulipe)



Energie renouvelable et transition écologique, l'enjeu d'aujourd'hui

Comment les barrages participent-ils à la transition écologique?



**Les Barrages,
à la fois une
source d'énergie
et une sécurité
d'approvisionne
ment en eau**

Conférence CERES
Liège, 09/05/2023

 **Lombardi**

Cécile Crémer

Energie renouvelable, transition écologique, décarbonisation

Le projet européen de décarbonisation de la production d'électricité, en application de l'Accord de Paris de 2015, est mis en œuvre en Italie, comme dans le reste de l'Europe, dans le Plan National Intégré pour l'Energie et le Climat (PNIEC).

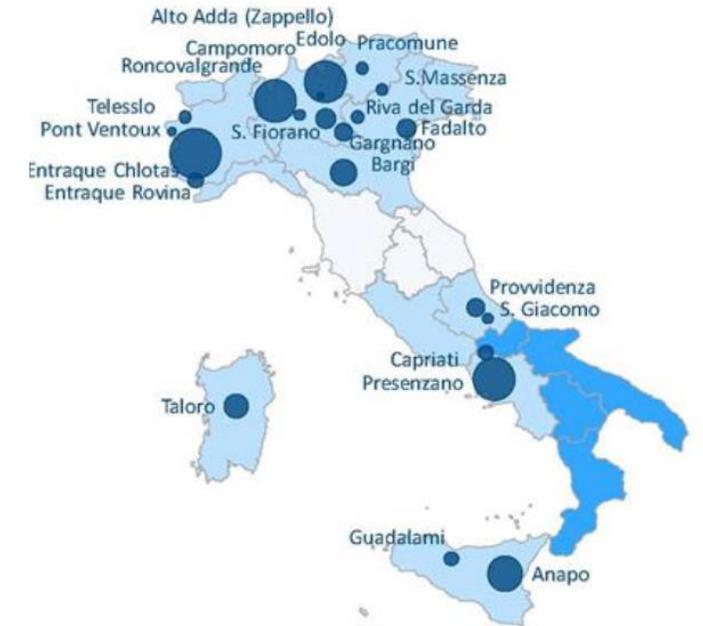
Avec le PNIEC, des objectifs nationaux sont fixés pour 2030 en matière d'efficacité énergétique, d'énergies renouvelables et de réduction des émissions de CO2, à l'exclusion des centrales au charbon.



La transizione energetica



Localisation des principaux aménagements hydro-électriques

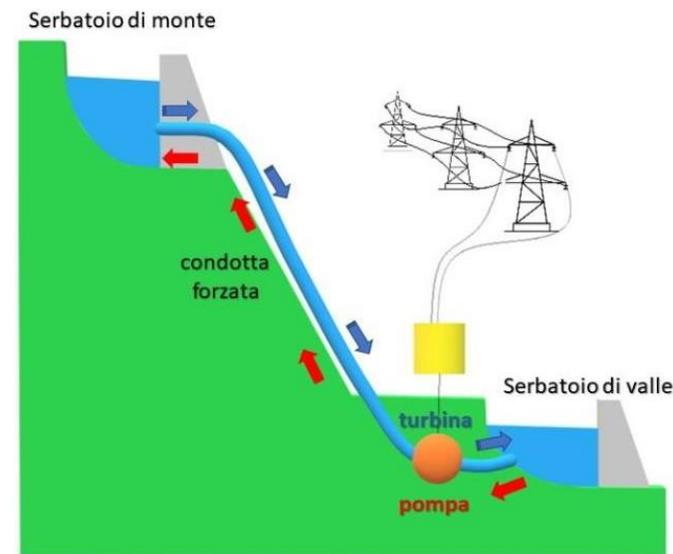
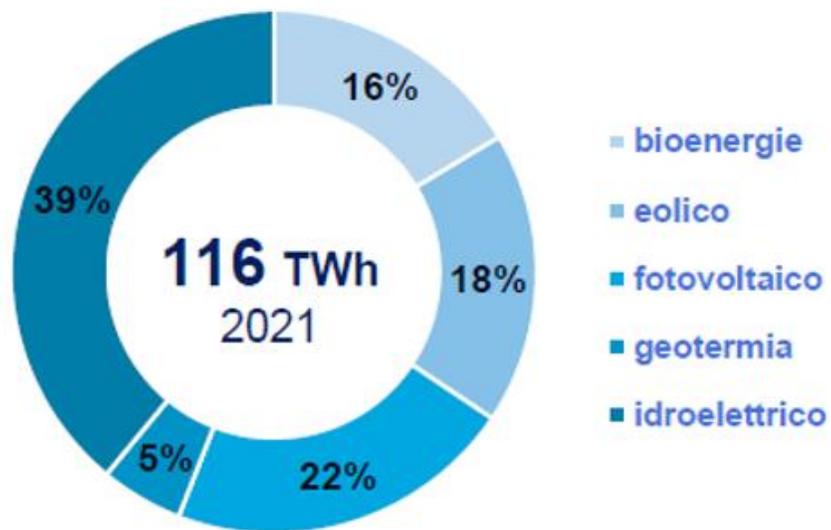


Energie renouvelable, transition écologique, décarbonisation

Les centrales réversibles, qui fonctionnent donc en pompage et en turbinage présentent des caractéristiques techniques complémentaires à celles des centrales renouvelables non programmables (éolien, photovoltaïque).

En effet, elles constituent la seule ressource disponible pour le stockage de l'énergie à grande échelle (batterie), avec la possibilité d'absorption pendant les heures d'ensoleillement ou de grand vent.

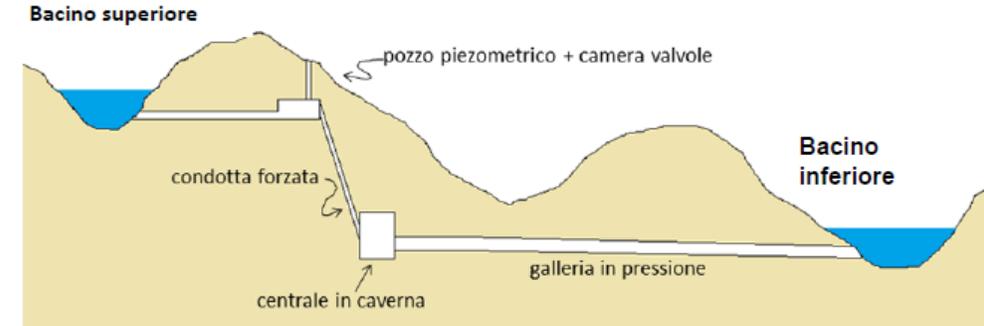
Répartition mondiale de la production d'énergie renouvelable(ICOLD)



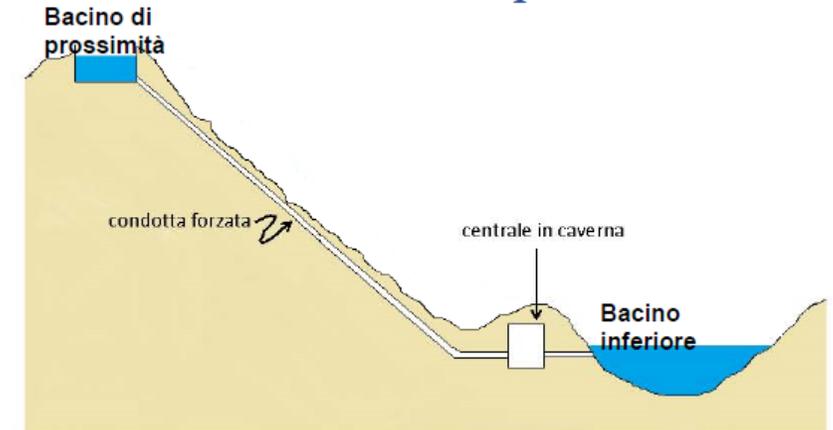
Energie renouvelable, transition écologique, décarbonisation

- Le territoire italien, en raison de ses caractéristiques [géomorphologiques](#) particulières, présente dans toutes les régions d'[importants réservoirs susceptibles d'accueillir de nouvelles centrales hydroélectriques](#).
- Ces réservoirs, qui servent actuellement pour l'approvisionnement en eau potable/industrielle et irrigation, [pourraient être complétés par des installations de pompage](#) pour l'utilisation de la capacité résiduelle.
- Il s'agit de [créer un bassin en amont ou en aval du réservoir existant](#) avec un dénivelé adéquat (B), sans interférer avec les usages existants, ou de [relier deux réservoirs existants](#) (A) au moyen d'une canalisation ou d'un tunnel, auquel cas une gestion intégrée des bassins est nécessaire, éventuellement avec des gestionnaires différents.

A. Collegamento invasi esistenti

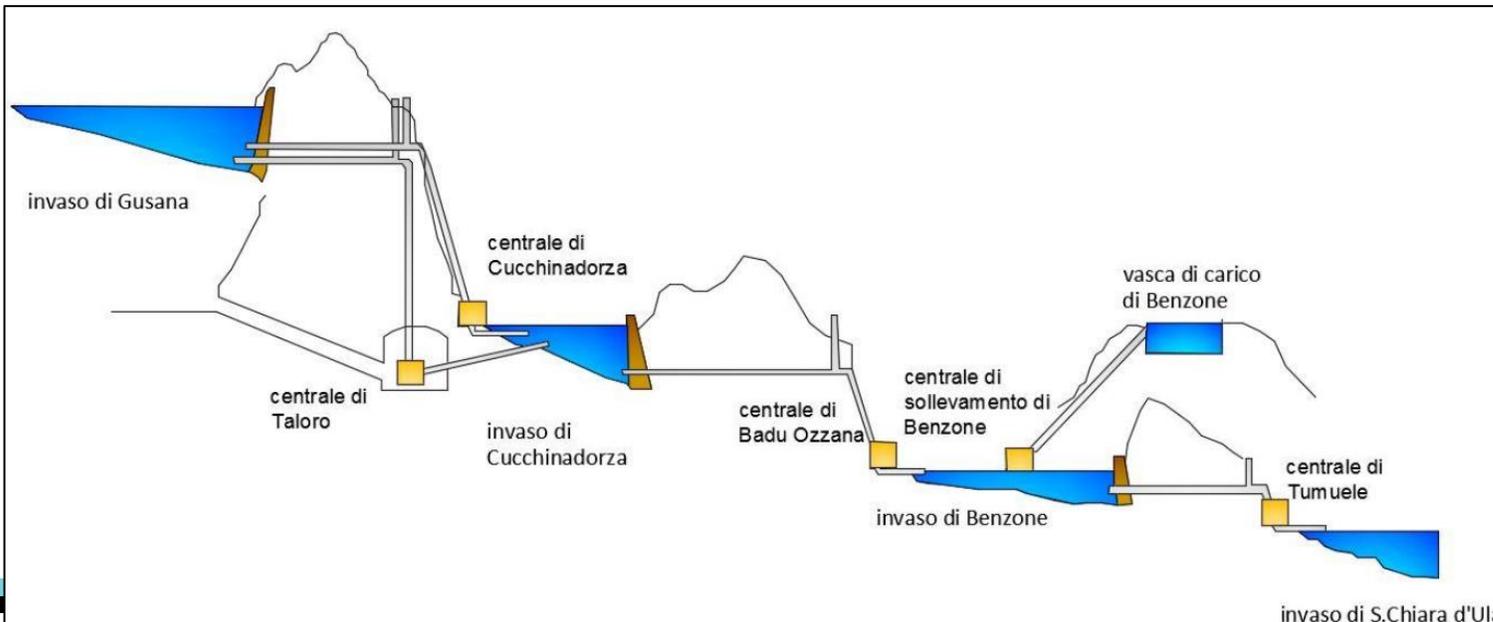
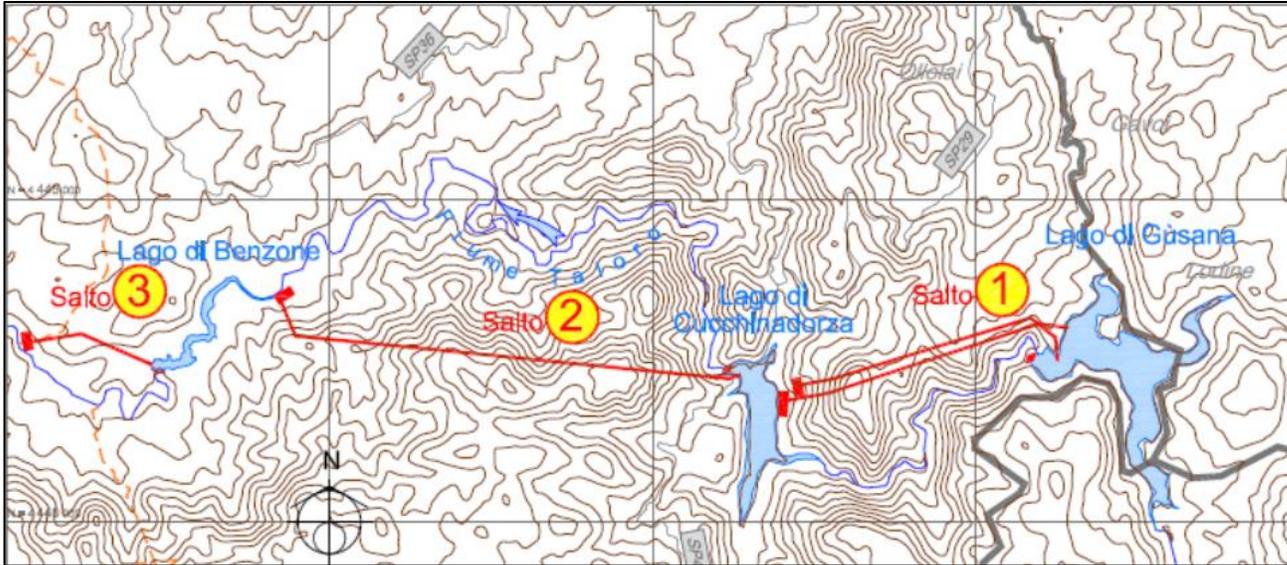


B. Formazione bacino di prossimità



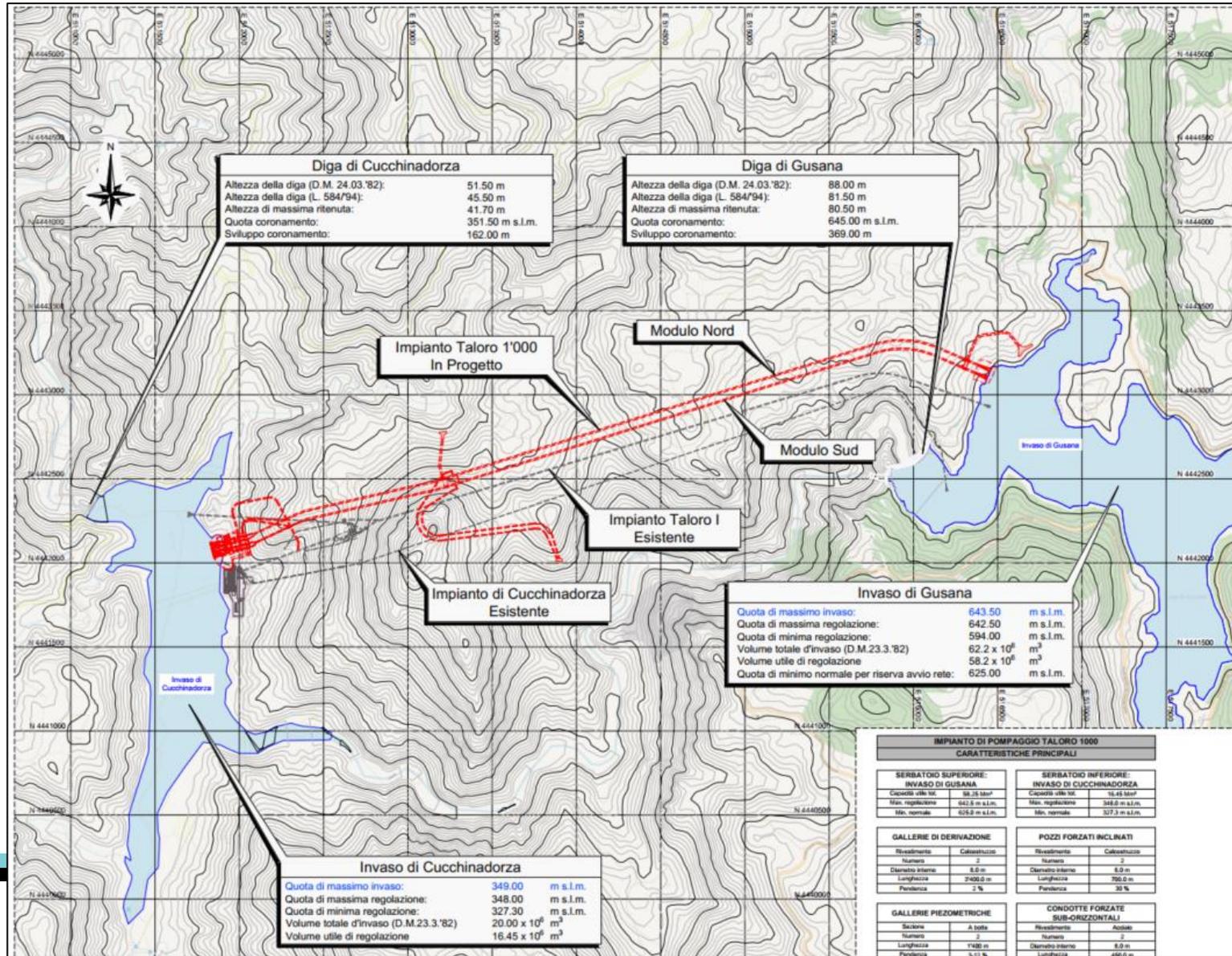
Energie renouvelable, transition écologique, décarbonisation

Complexe hydro-électrique réversible
Taloro 1000 (Sardaigne) de Enel
Green Power (construit entre 1962 et 1978)



Energie renouvelable, transition écologique, décarbonisation

Complexe hydro-électrique réversible Taloro 1000 (Sardaigne) de Enel Green Power

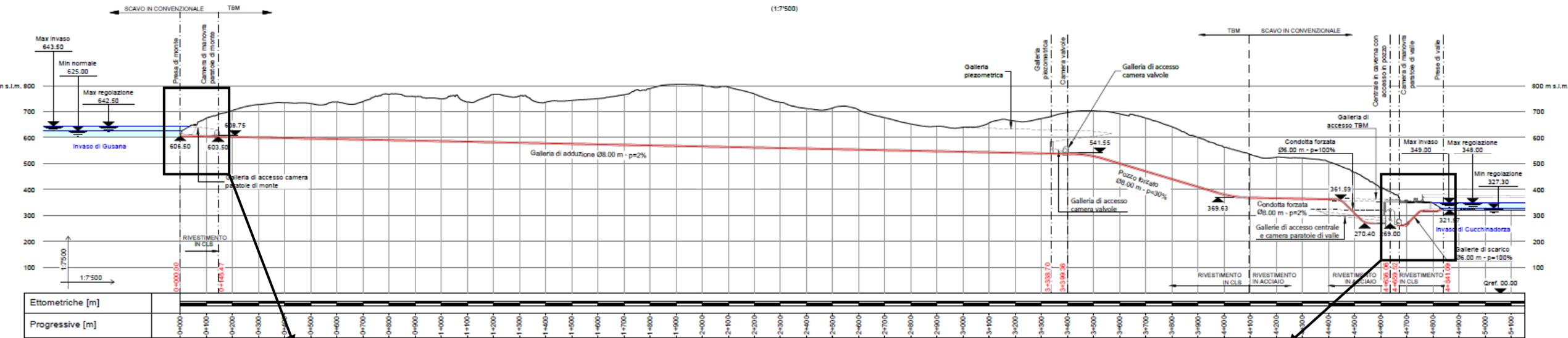


Energie renouvelable, transition écologique, décarbonisation

Complexe hydro-électrique réversible Taloro 1000 (Sardaigne) de Enel Green Power

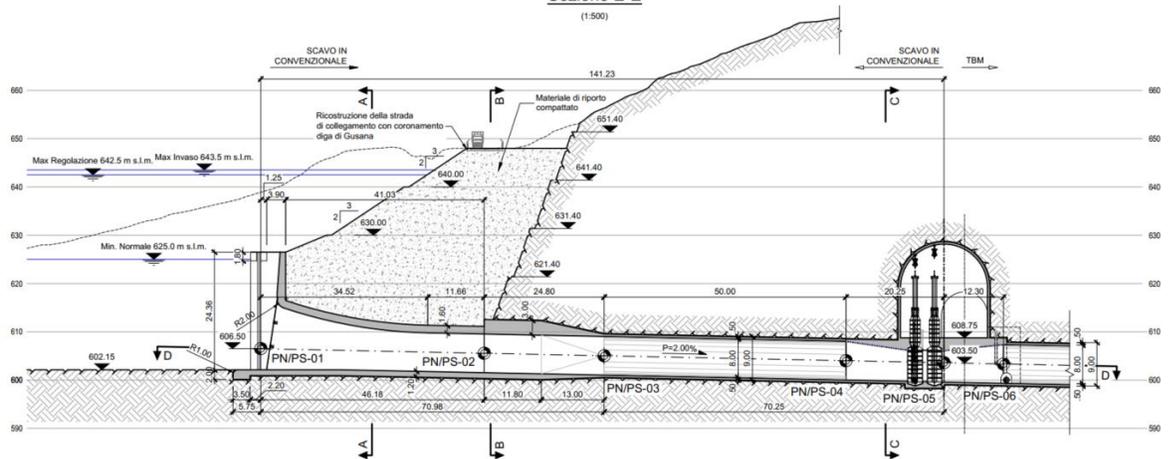
Profilo longitudinale modulo Nord

(1:7'500)



Sezione E-E

(1:500)



L'étude des barrages, un métier passionnant

Pourquoi aimer ce métier?



**Les Barrages,
à la fois une
source d'énergie
et une sécurité
d'approvisionne
ment en eau**

Conférence CERES
Liège, 09/05/2023

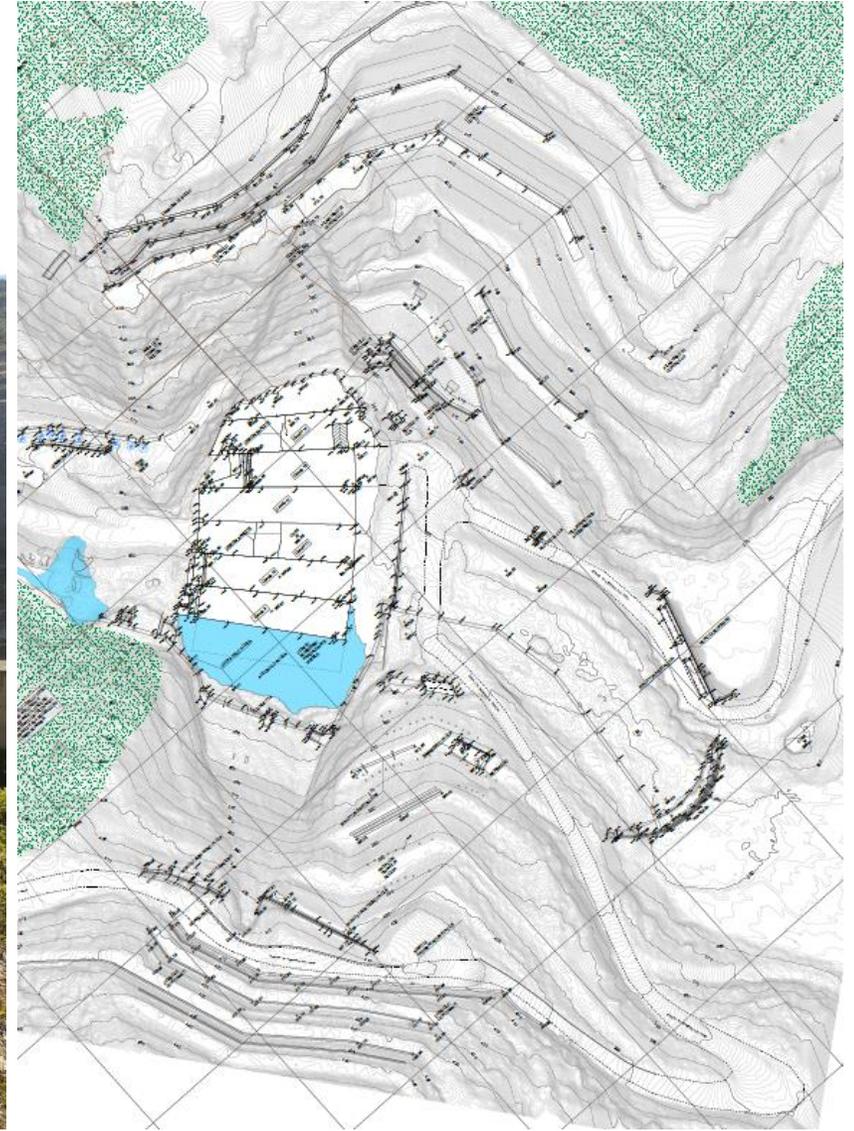
 **Lombardi**

Cécile Crémer

L'étude des barrages, un métier passionnant multidisciplinaire

RELEVÉ TOPO 3D: Laser scanner

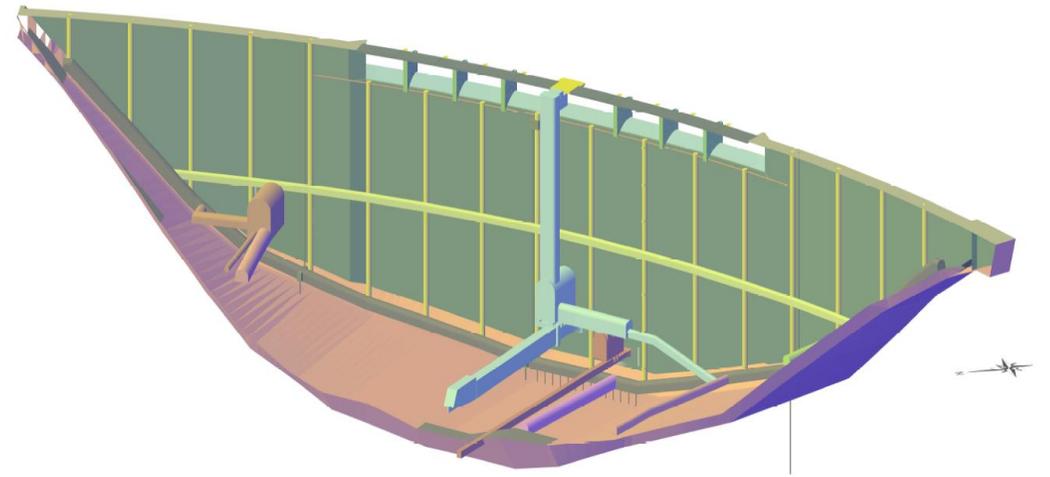
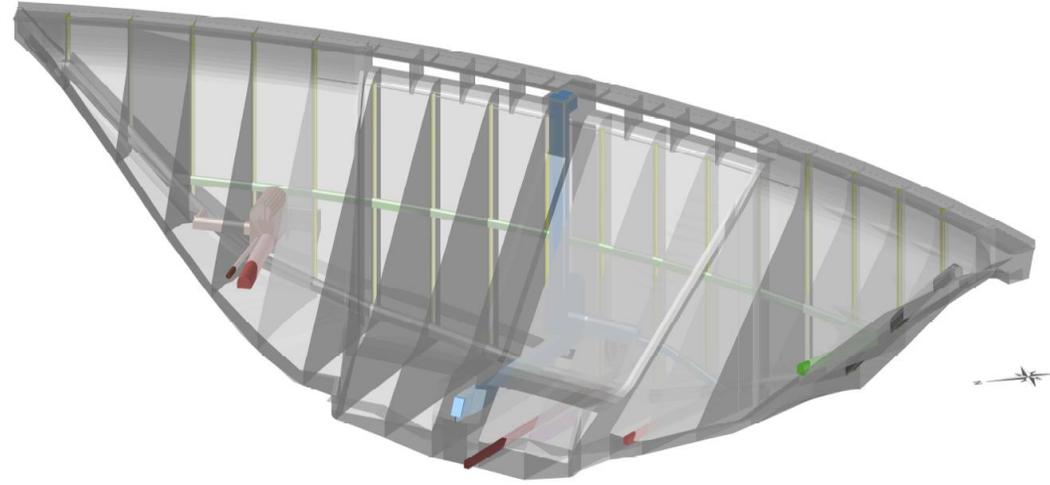
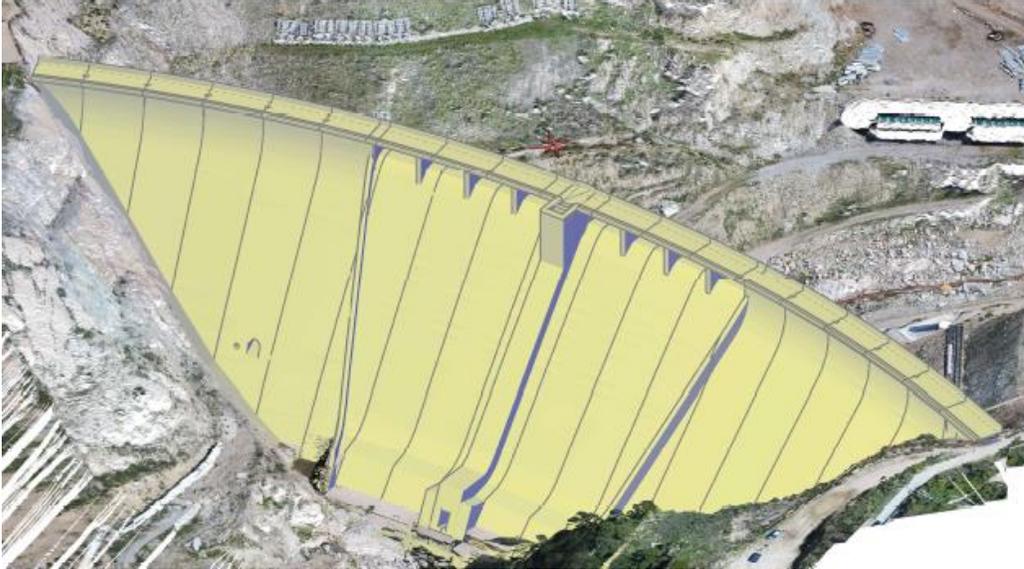
Barrage de Cumbidanovu (Sardaigne)



L'étude des barrages, un métier passionnant multidisciplinaire

CONSTRUCTION DU MODELE 3D

Barrage de Cumbidanovu (Sardaigne): Autodesk Civil 3D – Projet et Rendering



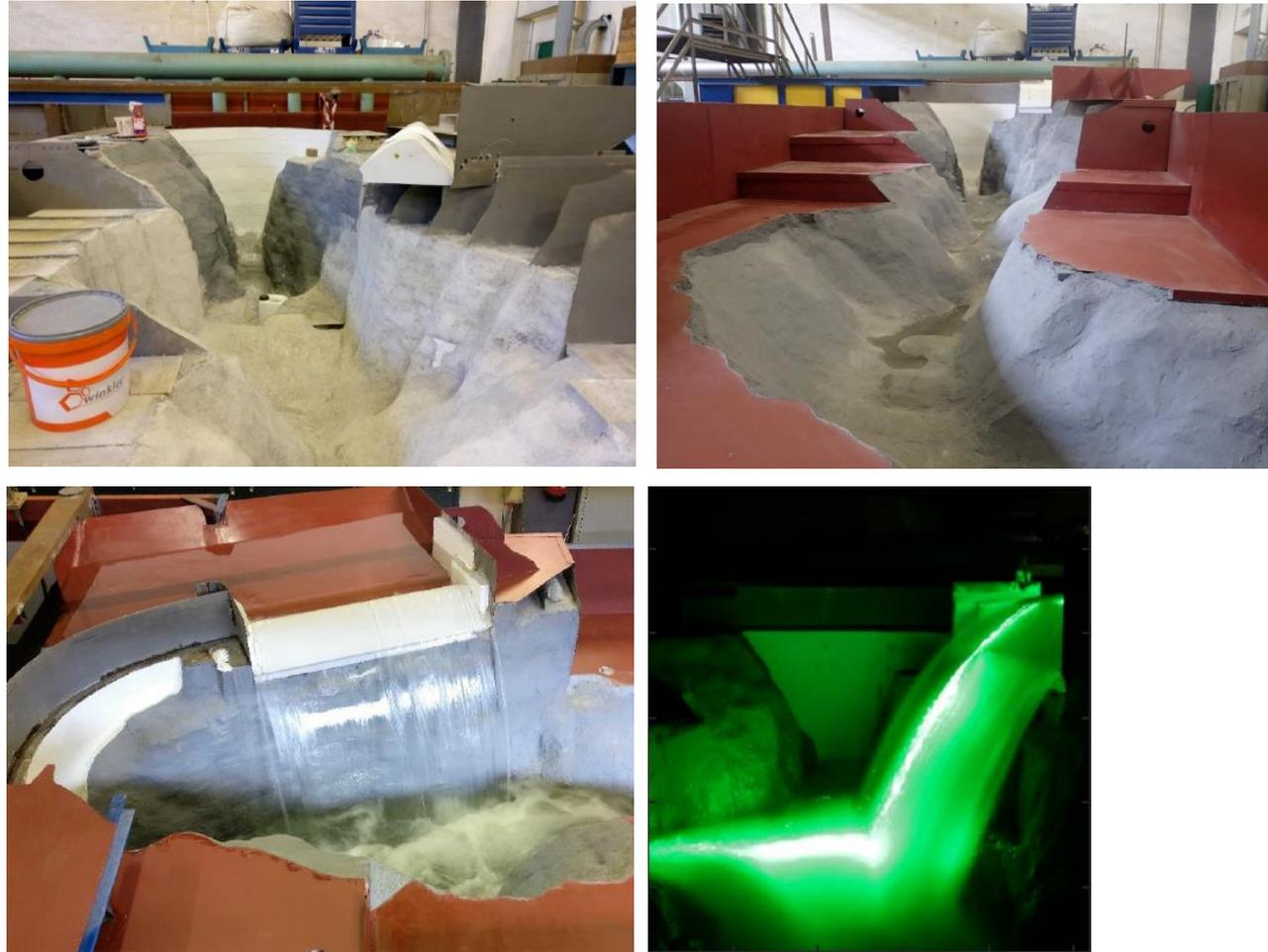
L'étude des barrages, un métier passionnant multi-disciplinaire

MODELISATION PHYSIQUE HYDRAULIQUE

Evacuateurs de crue latéral et central du Barrage du Gurzia (Piémont)



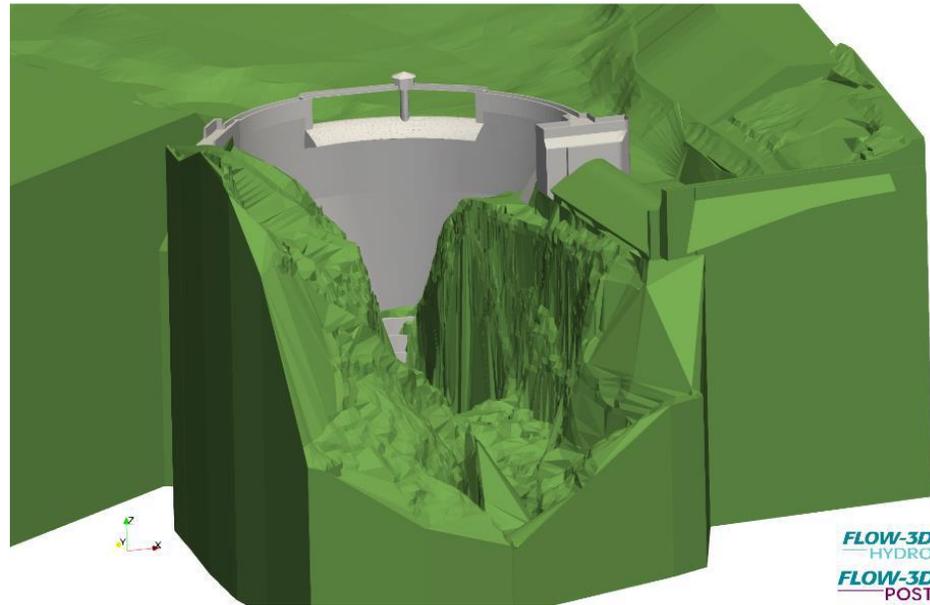
Modèle physique réalisé au laboratoire Polytechnique de Turin



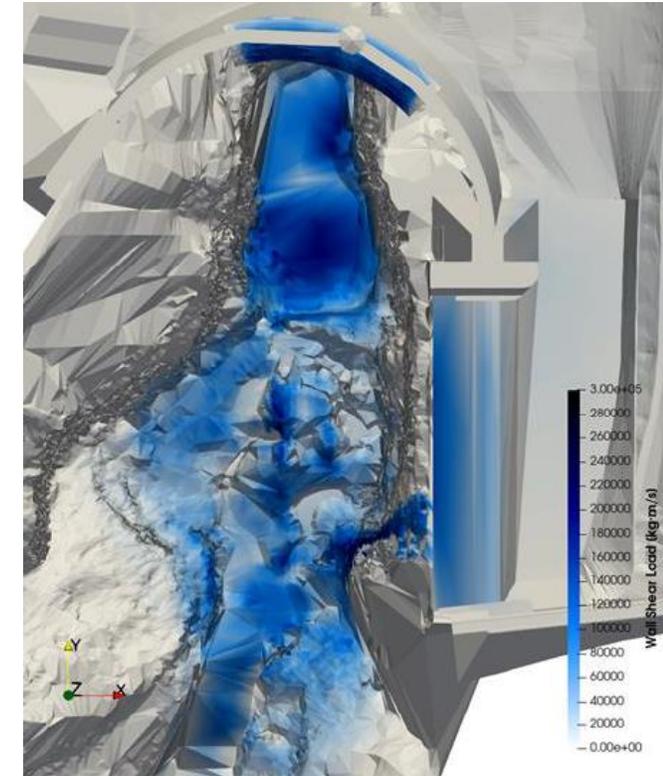
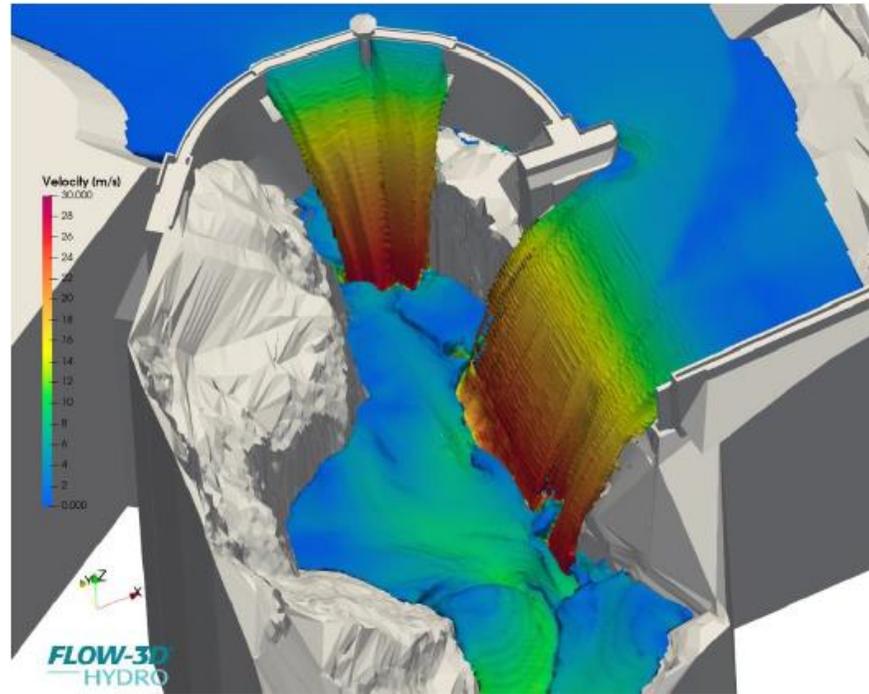
L'étude des barrages, un métier passionnant multi-disciplinaire

MODELISATION NUMERIQUE HYDRAULIQUE

Modèle géométrique 3D pour projet d'augmentation de la capacité hydraulique de l'évacuateur central ($Q=1'400\text{mc/s}$)



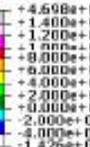
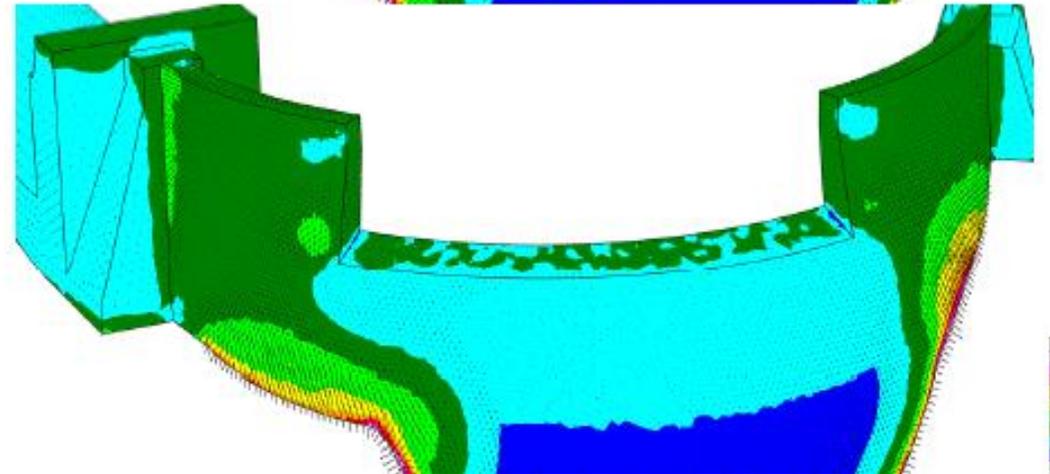
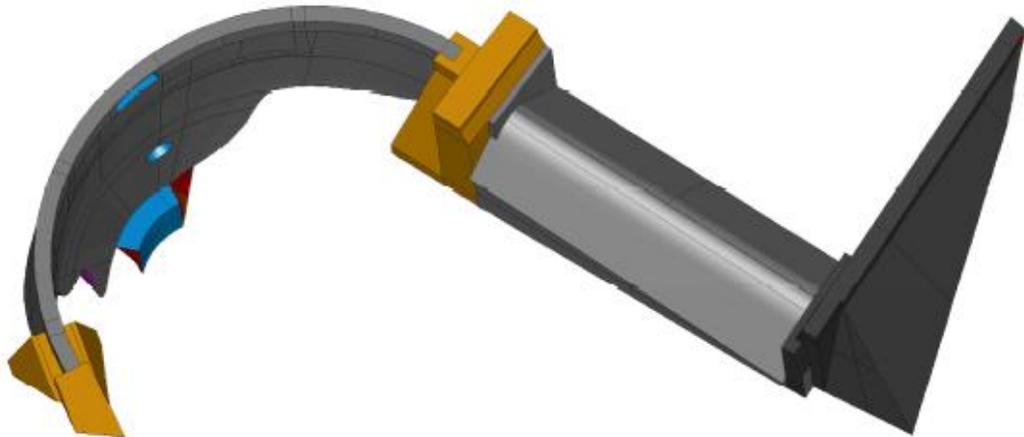
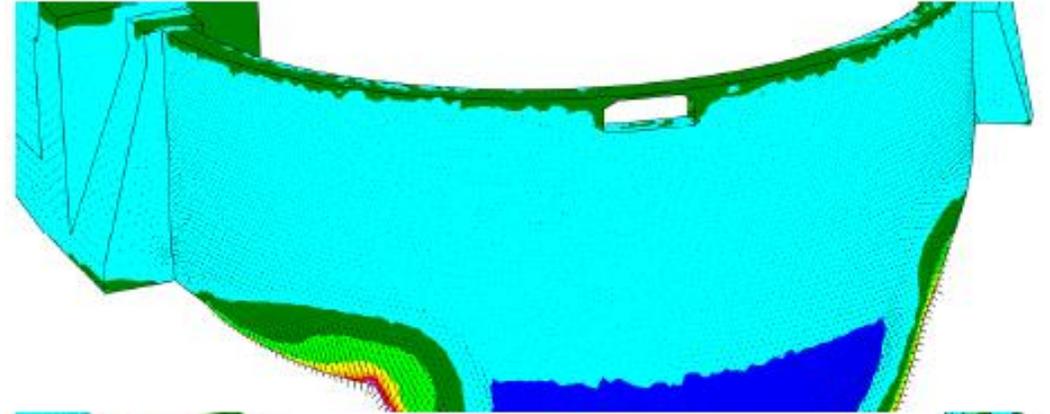
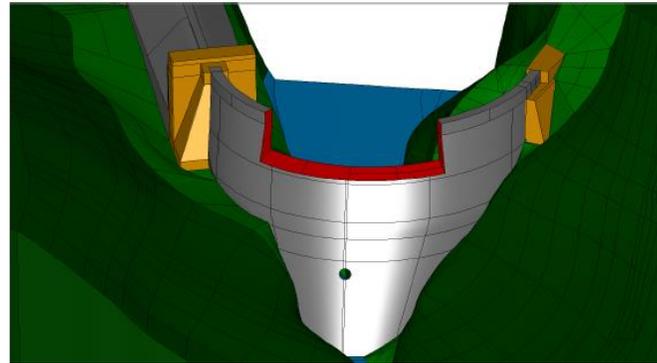
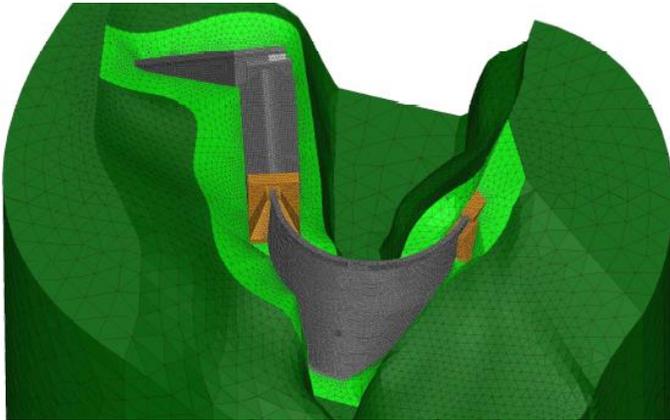
Modèle numérique CFD Flow 3D Hydro



L'étude des barrages, un métier passionnant multi-disciplinaire

MODELISATION NUMERIQUE GEOTECHNIQUE

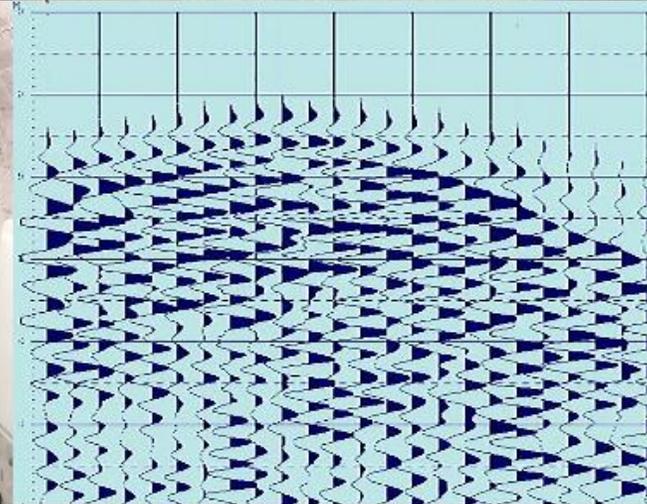
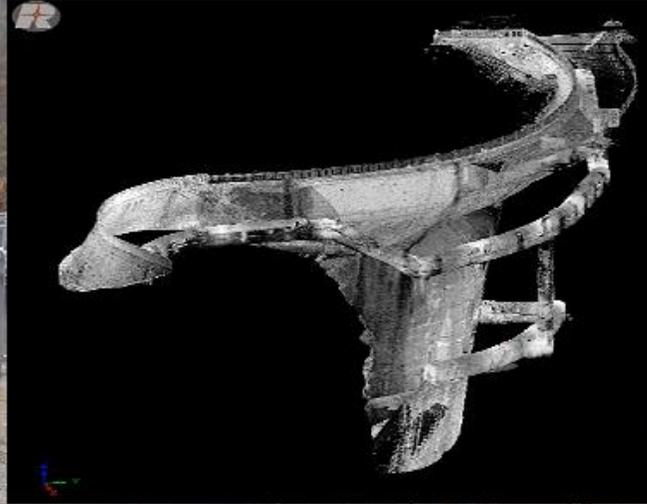
Modèle numérique FEM 3D du barrage de Gurzia (Abaqus)



L'étude des barrages, un métier passionnant multi-disciplinaire

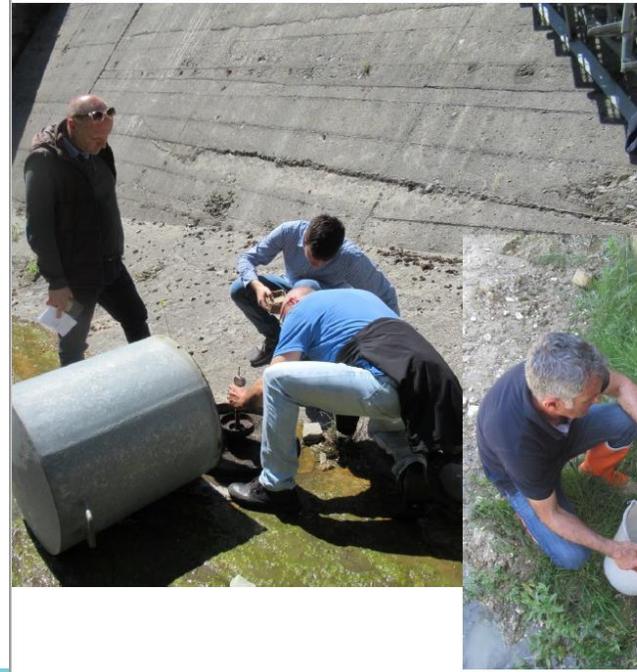
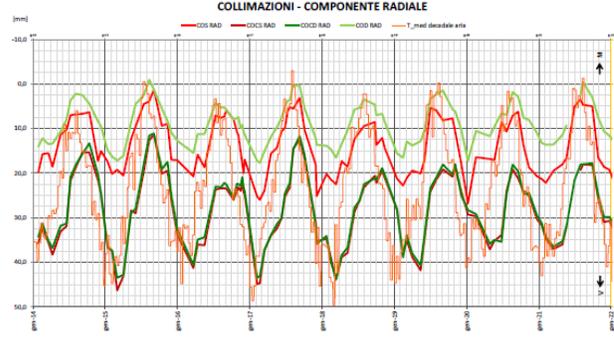
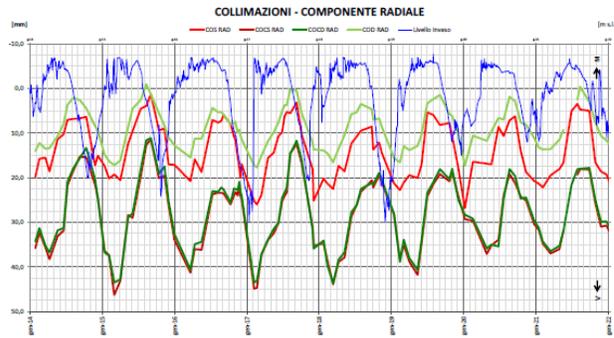
RECONNAISSANCES GEOTECHNIQUES ET DIAGNOSTIQUES

Relevés topographiques au laser scanner et prospections géophysiques à réfraction dans les galeries



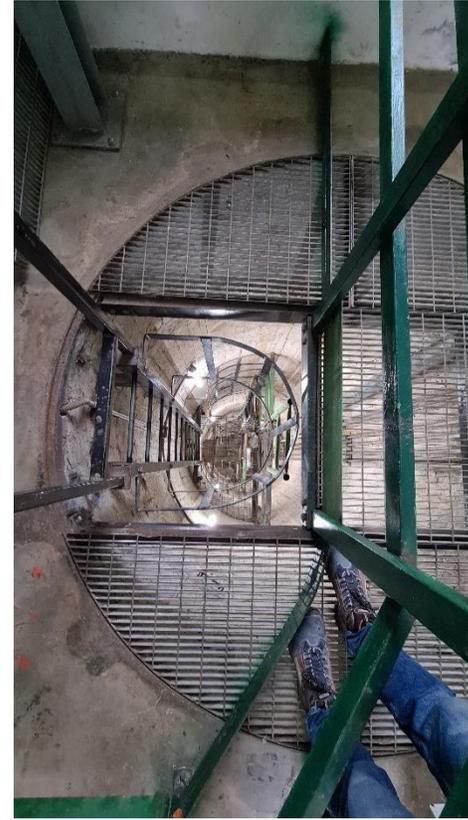
L'étude des barrages, un métier passionnant multi-disciplinaire

AUSCULTATION ET SURVEILLANCE



L'étude des barrages, un métier passionnant multi-disciplinaire

AUSCULTATION ET SURVEILLANCE



L'étude des barrages, un métier passionnant multi-disciplinaire

SENSIBILITE A L'ENVIRONNEMENT

Débit minimal réservé, échelle de remontée des poissons, repopulation du site avec espèces autochtones de la faune et de la flore, étude de l'écosystème aquatique et mesures de mitigation,...



Exemples d'échelle de remontée des poissons

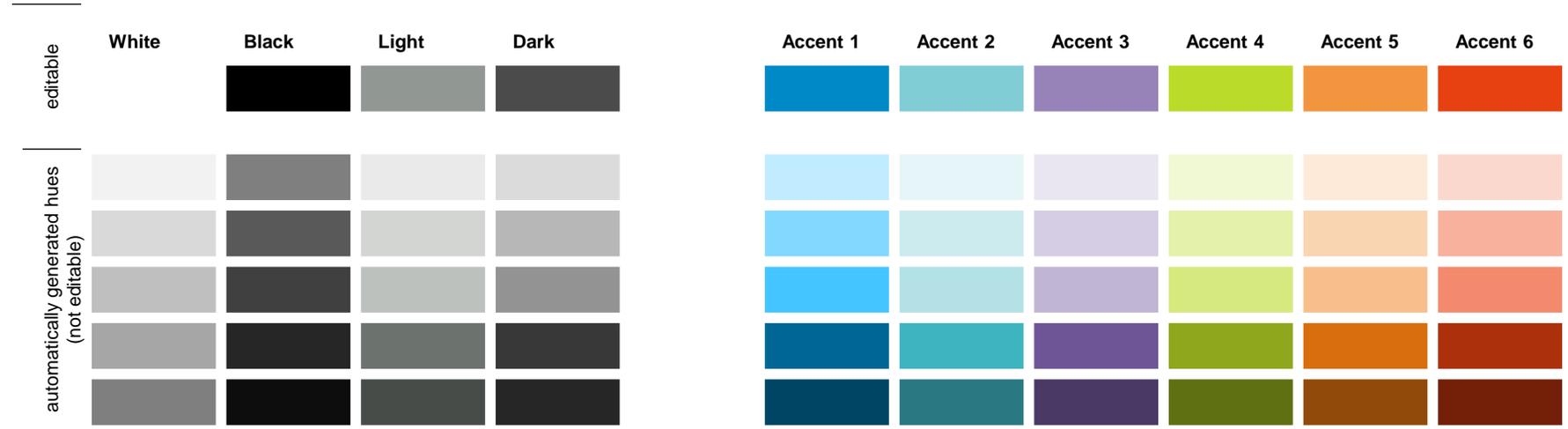


L'eau, un bien précieux pour tous! Au service des populations locales



Projet de barrage
en Guinée-Conakry

Colour scheme



Charts and SmartArt automatically make use of accent colors

