

Un nouvel âge d'or pour les barrages ?

A new golden era for dams?

Luc Deroo^{1*}, Jean-Jacques Fry², François Lempérière³, Adama Nombre⁴

¹ISL, Lyon, France

²European Club of ICOLD, Chambéry, France

³Hydrocoop, Paris, France

⁴Comité National des Barrages du Burkina-Faso, Ouagadougou, Burkina Faso

Résumé. Les besoins en eau, en électricité renouvelable et en protection contre les inondations et les sécheresses sont considérables ; le stockage d'eau est un moyen historique et naturel d'y contribuer. Pourtant, le rythme de construction de nouveaux réservoirs est plus lent que l'augmentation des besoins. Le comité « Utilisation émergente des réservoirs » de la CIGB a dressé ce constat et suggéré des pistes pour y remédier. Une piste essentielle est l'innovation. En plus des ouvrages classiques, il est possible de proposer des options nouvelles, pilotées par des enjeux sociétaux qui changent la donne : chute du prix du solaire et de l'éolien, évolution de l'opinion publique à l'égard des enjeux environnementaux, changement climatique : rareté de la ressource et catastrophes naturelles, évolution des modes de financement des projets, technologies informatiques. Cette présentation propose un tour d'horizon d'idées neuves, parfois « sages », parfois provocantes, mais toujours à fort potentiel, et en fait presque toujours multiusage. Barrages de bords de mer, réservoirs hydro-solaires, twin dams, réservoirs alimentés par pompage des crues, réservoirs à vocation de biodiversité, barrages écrêteurs vannés, etc... Ces idées, et d'autres, pourraient bien alimenter un nouvel âge d'or pour les barrages (au sens large !) tant les besoins sont forts.

Abstract. The need for water, renewable electricity and protection against floods and droughts is considerable; water storage is a historical and natural way to contribute to this. Yet the pace of construction of new reservoirs is slower than the increase in needs. The ICOLD "Emerging Utilization of Reservoirs" committee has drawn up this observation and suggested ways to remedy it. One essential avenue is innovation. In addition to conventional works, it is possible to propose new options, driven by societal issues that are changing the game: falling prices of solar and wind energy, changes in public opinion regarding environmental issues, climate change: resource scarcity and natural disasters, changes in project financing methods, digitalization. This presentation offers an overview of new ideas, sometimes "wise", sometimes provocative, but always with strong potential, and in fact

* Corresponding author: deroo@isl.fr

almost always multi-purpose. Dams at sea, hydro-solar reservoirs, twin dams, reservoirs fed by flood pumping, biodiversity reservoirs, etc. These ideas, and others, could well fuel a new golden age for dams (in the broadest sense!) as the needs are so great.

1 Les besoins futurs

La profession s'accorde à penser qu'il devrait y avoir des besoins futurs importants en nouvelles retenues artificielles. Cette partie de l'article essaie de préciser ce diagnostic. Pour cela, trois arguments sont successivement présentés :

1. Il y a des moteurs forts à l'œuvre : les besoins sont importants, et il faudra donc y donner suite.
2. Pour cela, des alternatives aux retenues existent, mais elles ne couvrent pas tous les usages. Il faudra donc de nouvelles retenues.
3. L'approche économique, même très simplifiée permet de préciser le besoin : il s'agit d'un besoin « multiusages ». Il s'agit d'un besoin dont l'expression et la compréhension dépassent l'inventaire classique des dépenses et de recettes monétisables. Ce point de vue a une influence sur la manière d'exploiter les retenues actuelles, et de concevoir les projets futurs.

1.1 Des besoins futurs importants et variables

Les besoins futurs résultent d'évolutions variées, qui sont autant de *moteurs*. Les principaux moteurs sont les suivants :

- Croissance : démographie & augmentation de la consommation individuelle en eau & pression anthropique sur les milieux
- Croissance encore plus rapide de la Demande en électricité
- Urbanisation et concentration des enjeux humains et économiques
- Changement climatique : mitigation du CC, en limitant la production de GES
- Changement climatique : adaptation aux effets du CC

Ces moteurs ne sont pas d'activité égale partout dans le monde.

Les retenues de barrage sont concernées par ces moteurs d'évolutions, car les retenues de barrages rendent des services variés, et car ces services sont corrélés aux moteurs d'évolution.

Les principaux services rendus par les retenues sont les suivants :

- Énergie : production d'électricité renouvelable
- Énergie : stockage de l'électricité, services au réseau
- Ressources en eau : régulation annuelle (ou interannuelle pour les contextes arides et semi-arides)
- Ressources en eau : réserves de secours en cas sécheresses
- Inondations : contribution à la protection contre les crues
- Biodiversité : soutien à la richesse des milieux d'eau douce (sans oublier que les retenues génèrent d'abord des impacts négatifs sur les rivières)
- Lacs : agrément, tourisme

Ces services ne sont pas recherchés avec une égale force partout dans le monde.

La corrélation entre moteurs et services est plus ou moins directe. Par exemple : le moteur Demande en électricité active directement le service Production d'électricité renouvelable ; le moteur Croissance démographique influe positivement le service Stockage de l'électricité ; le moteur Urbanisation n'a pas d'incidence sur le service Régulation annuelle.

Enfin, les services rendus par les retenues apportent une réponse d'adéquation variable aux différents besoins. Dans certains cas, les retenues constituent une réponse parmi d'autres,

dans d’autres cas, cela peut être la seule réponse possible. L’adéquation des retenues aux besoins exprimés n’est pas identique dans toutes les régions du monde.

Des tableaux croisant besoins et services rendus par les retenus peuvent être bâtis à partir des considérations précédentes, en multipliant quatre notes :

Note Valeur	Activité du Moteur	Importance du Service	Poids de la Corrélation	Adéquation de la solution
1	Augmentation	Utile	Influence	Une réponse efficace
2	Augmentation forte	Important	Corrélation directe	La réponse de référence
3	-	Vital	-	La seule réponse possible

Ainsi, la note maximale pour un service rendu par les barrages est 36 (2*3*2*3). Lorsqu’un service est incité par plusieurs moteurs, la note globale peut dépasser 36.

La synthèse de l’évaluation est présentée ci-dessous pour plusieurs zones géographiques d’Europe et d’Afrique, couvrant des contextes géographiques, climatiques et humains très variés.

Tableau 1. Poids des *Moteurs* dans les besoins futurs.

	Démographie	Demande en électricité	Urbanisation	Chgt clim. : mitigation	Chgt clim. : adaptation
Europe du Nord-Ouest	0	34	7	24	46
Méditerranée Nord	0	24	12	48	97
Méditerranée Sud	128	48	12	20	85
Afrique Sahélienne	132	54	8	0	82
Afrique de l’ouest	100	66	8	0	19

Tableau 2. Évaluation synthétique des besoins futurs en nouvelles retenues.

RESULTATS	Europe du Nord-Ouest	Méditerranée Nord	Méditerranée Sud	Afrique Sahélienne	Afrique de l’ouest
(typiquement :	(France N, Suisse, Allemagne, UK)	France S, Italie, Espagne, Balkans, Grèce	Algérie, Tunisie, Egypte)	Mali, Niger, Burkina)	Cameroun, Gabon, RDC)
Energie : production ENR	0	18	30	36	72
Energie : stockage, services au réseau	40	45	75	60	48
Ressources en eau : régulation annuelle	4	36	72	72	24
Ressources en eau : secours sécheresses	24	36	72	72	18
Inondations : mitigation crues	14	15	39	26	23
Biodiversité : soutien richesse des milieux d’eau douce	18	16	10	10	8
Lacs : agrément, tourisme	3	6	0	0	0
TOTAL	103	172	298	276	193

Cet exercice comporte nécessairement une part d'arbitraire. D'une part dans la définition des zones géographiques (les zones évaluées ci-dessous ne sont pas complètement homogènes : il faudrait subdiviser encore) et dans l'attribution des notes, qui ne ressort pas d'une procédure strictement objective. Cependant, les résultats sont jugés suffisamment fiables pour tirer différents enseignements.

D'abord, il apparaît que des besoins en nouvelles retenues apparaissent dans chaque zone géographique. Ainsi, sauf si des solutions alternatives apparaissent à l'avenir, il faudra créer de nouvelles retenues dans tous les territoires. Ces nouvelles retenues n'auront pas partout la même vocation : les motivations pour ces nouvelles retenues varient. Par exemple :

- En Europe du NW, les moteurs sont la demande en électricité et le changement climatique (mitigation / adaptation). Les nouvelles retenues seraient essentiellement destinées au stockage de l'électricité (STEP), à la résilience (inondations / sécheresses) et au soutien à la biodiversité. Mais il n'y a pas de demande spécifique pour de nouvelles retenues à vocation de production d'énergie renouvelable.
- Au Sahel, les moteurs sont la démographie, la demande en électricité et l'adaptation aux conséquences du changement climatique. Les nouvelles retenues serviraient essentiellement au stockage et à la régulation, à différentes échelles de temps : journalier (électricité), saisonnier (régulation du flux annuel) et interannuel (sécheresse). Mais aussi à la production électrique.

Les motivations de demain ne sont pas toujours celles d'hier. Par exemple, la production d'électricité n'est plus partout le service prioritaire, en raison des alternatives possibles par le solaire et de l'éolien (Europe), ou en raison de la raréfaction de la ressource hydrique (Méditerranée).

Les besoins en stockage de l'électricité apparaissent dans les différentes zones géographiques investiguées. Les retenues apportent classiquement des réponses, via les STEP ; et notons que les retenues de STEP nécessitent de l'ordre de dix fois moins de surface (par MW ou GWh) que les retenues destinées à la production. Le modèle des STEP classique, avec grande hauteur de chute et petit volume demeure une solution de référence. Mais de nouveaux modèles sont également nécessaires, pour différentes raisons :

- Les STEP classiques sont mal adaptées aux pays plats (une partie de l'Europe Nord-Ouest, Afrique sahélienne),
- Les STEPS classiques n'offrent pas nécessairement de stockage en volume suffisant pour compenser les intermittences du solaire et de l'éolien,
- Les STEP classiques nécessitent des réseaux robustes,
- Les STEP classiques nécessitent de créer de nouvelles retenues ; les STEPS futures pourraient devoir s'inscrire dans l'emprise de retenues de production existantes.

Les besoins futurs en retenues destinées à la régulation de la ressource en eau sont majeurs dans plusieurs régions, soit pour suivre la croissance, soit pour faire face aux aléas du changement climatique, soit pour les deux. La réponse peut être apportée à deux échelles complémentaires : l'échelle locale, via des petits barrages, et l'échelle régionale, par de grandes retenues structurantes. La construction de petits barrages se ferait en grand nombre, ce qui suscite des réflexions sur l'optimisation des coûts, la fiabilisation du service rendu, la question de sécurité et les impacts (sociaux, environnementaux) cumulés. La construction de retenues régionales structurantes pose des questions différentes. Le fait est que ces retenues sont nécessairement de grande capacité (et si possible interconnectées), pour qu'elles puissent agir en cas de sécheresse : il faut de la capacité pour stocker les crues, et il faut de la capacité excédentaire pour disposer de réserves en année sèche. Les très grandes retenues soulèvent des questions d'impacts sociaux et environnementaux, de coût, d'efficacité dans l'utilisation de l'eau, de compétition entre usages marchands (énergie) et

non marchands, de sécurité. Ces questions, qui ne sont pas nouvelles, peuvent trouver des réponses innovantes.

La biodiversité n'est pas encore, sauf rares exceptions, un moteur pour la construction de nouvelles retenues. C'est essentiellement aujourd'hui un frein à la construction et un moteur pour la déconstruction de barrages existants. C'est aussi un moteur pour la re-discussion de l'allocation de la ressource, avec par exemple, la question du soutien des étiages, ou des crues artificielles, et avec le constat que certains lacs artificiels sont devenus des lieux privilégiés de biodiversité, à préserver. L'impact de cette thématique devrait augmenter à l'avenir.

Constatant que les besoins évoluent, constatant qu'ils diffèrent sensiblement selon les régions, constatant leur multiplicité, trois conclusions s'imposent. La première est que les solutions techniques à apporter demain ne sont pas nécessairement les mêmes que les solutions utilisées hier : nous devons chercher des solutions nouvelles. La seconde est que les solutions techniques peuvent être très différentes selon les régions, ce qui multiplie d'autant la palette des solutions techniques à mettre au point. La troisième est qu'il y a un avantage évident au multiusage : un mètre cube d'eau stocké peut et doit rendre des services variés ; ce dernier argument est mis en évidence par l'approche économique discuté plus loin dans ce document.

1.2 Les alternatives aux barrages

Il se peut que, sur un site donné, le projet optimal de demain ne soit pas une retenue artificielle. Il existe en effet des alternatives permettant de rendre certains des services. Mais, pour toute une série de services, ce n'est pas le cas.

Service	Alternatives	Commentaires
Production d'énergie renouvelable	Solaire, éolien, biomasse	Solaire et éolien sont devenus compétitifs : dans plusieurs régions du monde, ils sont désormais moins chers et plus rapides à mettre en œuvre que l'hydro avec réservoir.
Production d'énergie garantie	Renforcement du réseau * Centrales thermiques (y. c. nucléaire) Solaire avec stockage	L'interconnexion et le renforcement des réseaux est souvent mise en œuvre. * L'hydro avec réservoir est l'option « renouvelable » de référence pour ce service.
Énergie : stockage et services au réseau	Thermique Hydrogène « gris » Parcs de batteries Air comprimé * Futur : hydrogène bleu / vert	Les batteries de moins en moins coûteuses deviennent une option pour régulation de fréquence. Les STEPS sont aujourd'hui les seules solutions non thermiques à pouvoir stocker des GWh ([15]).
Ressources en eau : régulation annuelle	Stockage par Recharge de nappe	Les solutions de recharge de nappe ne sont praticables que dans des contextes particuliers. Le volume annuel de recharge est ~10 km ³ ([16]), environ un millième du volume des retenues de barrage.
Ressources en eau : secours sécheresses	Pompage en nappe et recharge de nappe	Il faut une nappe. Et sécheresse correspond souvent à situation de nappe basse, avec risque de surexploitation.
Inondations : mitigation des crues	Résilience des territoires. Protections locales (digues).	

Biodiversité : soutien richesse des milieux d'eau douce	Ne rien faire	Concevoir une retenue avec objectif de biodiversité est difficile (impossible ?) en l'état actuel des connaissances. Les services rendus ne se révèlent souvent qu'avec le temps.
Lacs : agrément, tourisme	Ne rien faire	L'intérêt d'agrément et touristique, parfois majeur [17] ne se révèle qu'avec le temps.

Aucune alternative ne vient aisément remplacer les services de régulation des ressources en eau. Et aucune alternative renouvelable disponible ne vient réellement concurrencer l'hydroélectricité pour ses services de stockage / production d'énergie garantie. Ainsi, une part centrale de l'avenir des barrages réside dans ces deux services clés.

Faut-il poursuivre l'objectif de production d'électricité sur les retenues de barrage ? De toute évidence oui, lorsque les conditions sont réunies : dans de nombreux contextes géographiques, la production d'hydroélectricité demeure très compétitive, et dans de nombreux contextes géographiques, la maîtrise du coût de l'électricité est un facteur essentiel de lutte contre la pauvreté. L'expérience montre cependant que ce n'est pas toujours le cas, et, de l'avis des auteurs, il vaut parfois mieux renoncer à la production hydroélectrique classique pour ne pas pénaliser les autres services : l'avenir de la production hydroélectrique est très lié à sa flexibilité, sa garantie de puissance et ses services au réseau permettant l'introduction d'EnR intermittentes.

1.3 Approches économiques

Les approches économiques modernes ne se contentent pas de chiffrer les coûts d'investissement, les coûts d'exploitation et de mesurer la production issue de la vente de l'eau et de l'électricité. La notion d'externalité est devenue centrale. *L'externalité caractérise le fait qu'un agent économique crée, par son activité, un effet externe en procurant à autrui, sans contrepartie monétaire, une utilité ou un avantage de façon gratuite, ou au contraire une nuisance, un dommage sans compensation* (Wikipédia). Prendre en compte les externalités, c'est bien faire le tour complet de la justification des projets.

En matière de retenues de barrages, les externalités, positives et négatives, pèsent beaucoup. Elles demeurent difficiles à quantifier (puis à affecter) et sont de ce fait sous-valorisées dans la mise au point des projets. Les externalités négatives sont les impacts sociaux et environnementaux négatifs liés à l'enneigement de la retenue et aux modifications de la rivière à l'aval. Elles sont, en toute première approximation, proportionnelles au volume stocké, aux volumes prélevés dans la rivière, et à la superficie ennoyée. Les externalités positives sont liées à l'usage fait de la ressource : retombées indirectes liées à la production d'électricité (développement économique et social), à la production d'électricité garantie, aux services réseau (report d'investissements sur le réseau) et d'électricité renouvelable (mitigation du changement climatique), diminution des zones inondées en crue, soutien des étiages, et éventuellement soutien à certains compartiments de biodiversité.

La balance bénéfiques / coûts d'un projet se mesure alors par le quotient :

[bénéfices économiques monétisables + externalités positives] / [coûts monétisables + externalités négatives]

Le propos de cette section est de s'intéresser au numérateur. Les bénéfiques et externalités positives sont évaluées dans le tableau ci-dessous. Dans l'hypothèse où ils répondent à un besoin effectif (sinon, la valorisation est moins forte).

Bénéfices annuels	Unité €/ /	Valorisation (en ordre de grandeur)
Production d'électricité	kWh	Coût moyen de production : 8 c€/kWh [6–10] (selon [7])
Production d'électricité garantie	kWh	Par rapport à centrale gaz : 0 Par rapport à ENR intermittentes : non valorisé (intégré à valeur stockage).
GES évités	kWh	Par rapport à centrale gaz : 0,4 kgCO ₂ évité par kWh. Valeur économique tCO ₂ : 100 €/t [50 à 250] selon [8]. Donc 4 c€ / kWh. Par rapport à EnR : négligé (même si l'hydraulique est meilleur, notamment par rapport au solaire).
Valeur du stockage et des services au réseau électrique	kW/an	Approche par les bénéfices moyens, selon [[3] : 500 €/kW/an [300 – 2000]. Approche par les coûts, en prenant l'option la moins chère (STEP) : valeur [300-500] €/kW/an. On retient 400 €/kW/an
Alimentation en eau (populations, industries)	m3rég_AE*	Pour l'eau fournie, 0,7 selon [10]. La valeur est plus faible en sortie de retenue (service de transport / distribution non intégré). On retient : 0,35 €/m ³ .
Irrigation des cultures « marchandes »	m3rég_I	Pour l'eau fournie : 0,04 à 0,8 selon [10]. La valeur est plus faible en sortie de retenue (service de transport / distribution non intégré). On retient : 0,1 €/m ³ comme valeur plancher (en considérant que cela peut intégrer des externalités positives).
Irrigation des cultures de subsistance	m3rég_I	Il n'y a pas de valeur marchande. Il paraît légitime de considérer que les externalités positives (bénéfices sociaux) sont du même ordre de grandeur que la valeur monétaire des cultures « marchandes ». Lorsque l'irrigation devient essentielle à la vie humaine dans la région considérée, cette valeur peut largement augmenter. On retient : 0,1 €/m ³ en valeur minimale.
Écrêtement des débits de crue	m3sto/an	Le gain est fonction de la capacité de stockage en crue. Mais cette fonction est très variable, car elle dépend de facteurs hydrologiques, hydrauliques et économiques. [9] a recensé des exemples entre 0 et 2€/m ³ /an.
Soutien des étiages, pour les usages humains	m3rég_SE	Les besoins humains (assainissement, pêche, mode de vie), peuvent être soutenus par des opérations de gestion appropriées. La littérature ne fournit pas d'indications sur la quantification de ces services, dont la valeur doit être très variable. On fait l'hypothèse qu'ils sont du même ordre de grandeur que les services rendus pour l'agriculture, mais qu'ils sont parfois exclusifs l'un de l'autre : les eaux régularisées pour l'agriculture sont prélevées dans le milieu, et soustraites au soutien d'étiage.
Soutien des étiages, pour la biodiversité	m3rég_SE	Faute d'outils pour mesurer ces effets, les externalités positives associées au soutien des étiages ne sont pas comptées.

* m3rég : m3 régularisés en sortie de barrage à destination d'alimentation en eau (m3rég_AE) d'irrigation (m3rég_I) ou de soutien d'étiage (m3rég_SE) ; m3 sto : capacité disponible pour le stockage de la crue ; m3reserve/an : réserve disponible pour sécheresses, pour chaque année de mise à disposition.

Bénéfices annuels	Unité €/ /	Valorisation (en ordre de grandeur)
Crues artificielles	m ³ rég_SE	Les crues artificielles lorsque ces crues reproduisent le régime naturel de la rivière, et que ces crues inondent des zones humides étendues à l'aval, rendent des services multiples, sociaux et environnementaux. Faute d'élément de quantification, on considère que la valeur est au mieux celle du soutien d'étiage, et au pire 30 % de cette valeur. [0,03 à 0,1] €/m ³ .
Réserve stratégique en cas de sécheresse	m ³ reserve/an	Le secours en cas de sécheresse intervient typiquement 1 année sur 10. Le m ³ d'eau disponible est alors à forte valeur ajoutée, qu'il soit utilisé en énergie ou alimentation en eau. On retient une valeur cinq fois plus forte qu'en temps normal (0,5 à 2 €/m ³ fourni), probablement valeur par défaut. Mais ce stock n'est que rarement utilisé – moins d'une année sur 10, et pour une fraction du volume de réserve seulement. On retient une valeur plancher de 0,05 €/m ³ /an.
Agrément, tourisme	Ft/an	Ces services, parfois importants ([17]), ne sont pas valorisés ici.

Ce tableau, ne permet pas de décider si un projet est un bon projet ou non : d'une part il ne mesure que les bénéfices, et pas les coûts ; d'autre part, il postule que les besoins sont effectivement exprimés ; enfin, les valeurs qu'il fournit doivent être modulées pour chaque cas, car la mesure des bénéfices et des externalités dépend de chaque contexte.

Ces réserves étant faites, ce tableau présente deux intérêts : 1/ il fournit des ordres de grandeur utiles en première approche et 2/ il fournit des indications pour mesurer l'intérêt de projets différents et – typiquement – de fournir des indications sur l'intérêt des pistes techniques nouvelles décrites au §3. Et ce tableau, lorsqu'on l'applique à des cas réels, fournit deux enseignements :

- La « valeur » associée aux différents services économiques, sociaux et environnementaux sont dans les mêmes proportions. Pour augmenter la valeur d'un aménagement, il faut travailler tous les aspects. Ce résultat corrobore les approches plus qualitatives développées par certains acteurs (par exemple, WWF, [11]).
- Un m³ stocké peut compter plusieurs fois, par exemple s'il est turbiné au meilleur moment pour offrir de la garantie de puissance, s'il contribue de plus au soutien des étiages, et enfin si, sensiblement plus loin à l'aval, il vient alimenter des périmètres irrigués. Le multiusage augmente la valeur d'un aménagement.

2 Il faut de nouvelles idées

De nouvelles idées sont nécessaires pour au moins les raisons suivantes, qui découlent directement des conclusions du §1.

1. Il faudra construire de nouvelles retenues pour la régulation des ressources en eau : régulation annuelle, et secours sécheresse.
 - 1.1 Des petits barrages pour les communautés villageoises, et cela dans de très nombreuses régions du monde. Or, les petits barrages sont souvent trop chers, sont parfois peu sûrs, et ne rendent pas toujours le service attendu. Il faut donc de nouveaux petits barrages, et de nouvelles manières d'appréhender les petits barrages. Des idées émergent en ce moment.
 - Cf. §3, « petits barrages innovants »

- 1.2 Des grands barrages structurants, aux échelles régionales (éventuellement transnationales). Ces grands barrages sont nécessairement multiusages ; ils doivent rendre des services aux différentes communautés intéressées et impactées. Ce besoin s'est souvent heurté aux nécessités économiques, qui conduisent à privilégier les services monétisables (hydroélectricité, AEP, alimentation en eau industrielle, irrigation des cultures « marchandes »), générant des conflits d'usage. Des solutions nouvelles existent cependant qui permettent de mieux concilier ces exigences. C'est notamment le cas de l'hybridation hydro-solaire (cf. par exemple [5]).
- Cf. §3, « IoT, big-data et intelligence artificielle »
 - Cf. §3, « hydro-solaire »
2. Le stockage de l'électricité est un des grands enjeux. Cependant, des technologies concurrentes émergent, portées par des intérêts industriels puissants : batteries aujourd'hui, hydrogène demain. Et renforcement des réseaux. Les batteries, et l'hydrogène tel qu'il est produit aujourd'hui, ont des performances moins bonnes que l'hydro, à la fois en termes économiques et en termes de production de gaz à effets de serre. Pourtant, les perspectives [18] s'accordent à leur donner une place essentielle dans les développements futurs, car « while pumped hydro storage is projected to grow in the next decade, the technology deployment is largely constrained by the location of suitable sites. ». Il importe donc de trouver de nouvelles options d'installation de STEPS, qui seraient plus faciles à développer.
- Cf. §3, « hydro-solaire »
 - Cf. §3, « pompage »
 - Cf. §3 « barrages à la mer »
3. La régulation des cours d'eau a des impacts sur des écosystèmes riches, fragiles et rares : les rivières. Pour cette raison, dès lors qu'une régulation est nécessaire, il importe de réduire l'importance des impacts : ce qui conduit à concevoir des barrages parfois différents. Et il importe de maximiser les services rendus : services rendus aux populations (ressources, mitigation des crues, tourisme - agrément), et à l'environnement (soutien à la richesse des milieux). Cela conduit aussi à des conceptions éventuellement différentes.
- Cf. §3, « retenues hors-rivières »
 - Cf. §3, « IoT, big-data et intelligence artificielle »
- Une série de ces nouvelles idées est exposée au §3.

3 Les pistes techniques Nouvelles

3.1 Hybridation Hydro-solaire et twin dams

Le principe, séduisant, consiste à combiner les avantages du solaire (énergie abondante, devenue peu chère, et facile à développer) et de l'hydro (énergie stockable & pilotable, peu chère, et fournissant des services au réseau). Cette piste recouvre en réalité plusieurs idées :

- Floatovoltaics : Utilisation de lacs pour implanter des panneaux flottants [12].
- VPP (Virtual PowerPlant) [14] : Une centrale virtuelle est formée par l'exploitation conjointe de retenues hydroélectriques et de centrales solaires, opérées par un exploitant unique, et injectées sur le réseau de manière optimisée.
- ShSH et HhSH (Slightly hybridized Solar Hydro et Highly hybridized Solar Hydro) : hybridation hydro-solaire sur un barrage hydroélectrique existant [19] [5]. Un parc solaire est installé à proximité d'une retenue hydroélectrique ; un EMS (Energy Management System) assure l'hybridation.

- FSH (Full Solar Hydro) et Twindams : Centrale hydro-solaire, dans laquelle l'électricité est (essentiellement) apportée par le solaire et la régulation par l'hydro. Peut s'envisager sur barrage hydroélectrique ou barrage agricole [19] [5] [6].

Est-ce que cette technique peut contribuer à un nouvel « âge d'or » ? Oui, avec HhSH, FSH et Twindams, car l'hydro-solaire offre deux manières radicalement nouvelles de considérer les projets :

1. Avec l'hydro-solaire HhSH, l'exploitation des retenues de barrage peut se concentrer sur les services non énergétiques ; l'hydro-solaire apportant la composante énergétique nécessaire pour la justification marchande.
2. Avec l'hydro-solaire FSH et TwinDams, il s'agit d'un nouveau type de centrale de production d'électricité, essentiellement renouvelable, qui ne consomme pas d'eau, qui est entièrement pilotable, et qui n'est pas limité en puissance installée. En un mot : les centrales FSH et TwinDams peuvent, partout dans le monde, remplacer les centrales thermiques.

Le principe	Production d'électricité renouvelable, pilotable, avec services au réseau, sans consommer d'eau.
Justification économique	SsSH et HhSH sur un site hydro existant : ajoute de l'électricité renouvelable & pilotable au réseau, à un coût compétitif (un peu plus cher que le solaire pur). En compétition par rapport à du solaire pur, nécessite de valoriser les externalités liées au réseau (coûts évités de renforcement du réseau, coût évité de stockage d'électricité). SsSH et FsSH sur un site hydro existant : moins de consommation d'eau en saison sèche => gain en stockage et (barrages réservoirs à faible chute) gain en hauteur moyenne de chute. SsSH et FsSH sur un site hydro à construire : permet d'abaisser le coût moyen de production du kWh ; permet d'améliorer les performances du multiusage. FSH : peut remplacer une centrale thermique.
Quelques chiffres	Production d'électricité FsSH et SsSH: 5 à 10 c/kWh. FSH : de l'ordre de 7 à 12 c/kWh pour FSH de quelques centaines de MW. Et moins encore lorsque les sites sont très ensoleillés.
Maturité	Projets pilotes et amorce de projets commerciaux (Australie, Inde).
Challenges	CAPEX important ; portage par opérateur privé difficile (rémunération des services).
Où dans le monde ?	Partout où le solaire est économique.

3.2 Retenues hors rivière

Les retenues en rivière posent des problèmes environnementaux sérieux : ennoiment de zones à forte valeur écologique, obstacles à la migration des poissons. De plus, en pays arides et en pays plats, l'efficacité des retenues en rivières est pénalisée par l'évaporation et par le régime des rivières en pays arides : fortes crues et fort transport solide. Les retenues hors rivière offrent une alternative, certes pas nouvelle, mais pas assez souvent considérée. Des retenues hors rivière de grande ou très grande capacité peuvent trouver des justifications, comme le montrent plusieurs projets actuels.

Le principe	Un seuil de dérivation (ou du pompage) en rivière. Une retenue entièrement ou partiellement ceinte d'endigements. La vocation peut être stockage ou mitigation des crues.
Justification économique	Diminue le coût des externalités négatives à l'environnement (chiffrage difficile en l'état actuel des connaissances). Peut optimiser les coûts (évacuateur) et les services rendus (moins d'évaporation et envasement) en contexte pays plats et pays arides / semi-arides.
Quelques chiffres	Coût d'une retenue hors rivière : 1 à 10 €/m ³ selon les contextes. Coût de la station de pompage : 1,5 M€/MW. Pour une grande retenue à étanchéité naturelle (1 €/m ³), remplie par gravité ou pompage sous moins de 10 m de charge, et avec un seul cycle de remplissage par an, le bilan est positif : coût net actualisé du stockage d'eau ~ 0,06 €/m ³ (calcul avec taux actualisation 4 % sur 30 ans).
Maturité	Des réalisations probantes en plusieurs endroits du monde.
Challenges	Optimiser le coût des digues. Mieux évaluer les pertes par infiltration.
Où dans le monde ?	Territoires à forts enjeux de biodiversité. Pays plats (stockage). Zones arides et semi-arides.

3.3 IoT, big data et intelligence artificielle

Le multiusage est une clé essentielle pour optimiser les services rendus et, in fine, pour optimiser la rentabilité économique globale des aménagements. La difficulté réside dans la juste allocation des ressources, en fonction des besoins réellement exprimés :

- Quel débit relâcher pour optimiser l'utilisation agricole ?
- Quelle puissance turbiner pour s'adapter aux contraintes du réseau (ou au signal prix) ?
- Quel débit relâcher pour les besoins des écosystèmes ?
- Comment gérer au mieux les ouvertures de vannes en crue ?

Actuellement, et de manière classique, les données et outils utilisés à cet effet restent très sommaires, et ne permettent pas de gestion fine. Mais cela change : données satellites sur les niveaux des rivières et l'état de saturation des sols [20], appareils de mesure connectés et/ou bases de données qui fournissent des données (état du système : débits, cotes, fuites ; météo, hydrologie, état des sols ; besoins réseau, prix du marché) à des pas de temps et d'espaces de haute fréquence, nouvelles mesures à caractère environnemental (suivi des poissons, ADN environnemental par exemple) ; mesures sur les ouvrages permettant d'optimiser l'entretien et la maintenance. L'approche bigdata et IA offre des moyens de tirer profit de ces données très nombreuses.

De premières expériences tirent profit d'une partie de ces mesures, à des fins d'économie monétarisée : [14] [13] : gestion combinée hydro / solaire et éventuellement batteries pour limiter les pertes de production ; placement optimisé de l'électricité en fonction du signal prix (« spread » pic – hors-pic). Les gains, chiffrés par [13] sur deux cas particuliers sont de l'ordre de 10 %. Il est raisonnable de penser que les gains sur la bonne utilisation de l'eau en gestion de la ressource sont supérieurs.

L'intérêt immédiat réside donc dans une meilleure utilisation des réservoirs existants. L'intérêt à plus long terme est une meilleure justification des projets neufs : meilleure compétitivité marchande, et meilleure justification sociale et environnementale.

Le principe	Optimisation de la gestion par l'utilisation de données bien plus complètes et bien plus nombreuses.
Justification économique	Gains immédiats possibles sur la production électrique. Gains probablement très significatifs (>30 % ?) sur la gestion de la ressource.
Maturité	De premières expériences en cours.
Challenges	Mise en place d'incitation à l'optimisation de l'utilisation de la ressource – y compris pour les externalités.
Où dans le monde ?	Monde entier.

3.4 Petits barrages innovants

Les petits barrages ont bonne et mauvaise presse. Bonne presse car « small is beautiful » et, même si cela n'est pas bien démontré, il y a l'idée que les impacts (même cumulés) peuvent être mieux maîtrisés et que l'exploitation est plus à l'échelle des communautés rurales. Mauvaise presse, car l'expérience rassemble beaucoup de situations d'échecs : mauvaise adaptation à l'hydrologie, défaillances, difficulté d'entretien et de maintenance.

Les petits barrages futurs doivent être simples, peu chers, et sûrs. Ils doivent également prendre en compte les externalités. Les pistes sont les suivantes :

- Travailler à l'échelle régionale (mutualisée sur un parc de barrages) pour fournir les éléments permettant une juste appréciation des sujets suivants : évaluation des besoins, hydrologie des apports, des crues et du transport solide, externalités sociales et externalités environnementales.
- Revoir la conception des évacuateurs de crue de ces ouvrages : plus simples et moins sensibles aux incertitudes associées aux crues. Travailler à la résistance à la surverse.
- Au passage, regagner de la hauteur de stockage en limitant la revanche entre PHE et Crête, ce qui peut avoir un impact très important.
- Utiliser l'option du stockage hors rivière.

Le principe	Repenser la conception des petits barrages, pour en améliorer les performances, la sécurité et les modalités d'entretien
Justification économique	Les gains sont probablement importants. Gagner 1m de stockage pour 10 m de profondeur d'eau, c'est gagner 30 % en volume stocké ; Améliorer la fiabilité et la sécurité du parc, c'est gagner 10 % à 50 % en taux d'utilisation des petits barrages ; Simplifier la conception, c'est peut-être gagner 10 à 30 % en coûts. Cela concerne des dizaines ou centaines de millions de bénéficiaires directs et indirects.
Quelques chiffres	Selon [9], le coût actualisé du m ³ fourni par un petit barrage est dans la gamme [0,1 – 2,5 €/m ³]. Ce qui est donc plus que la valeur plancher du m ³ pour l'irrigation de subsistance. Les innovations ci-dessus pourraient permettre de diviser les coûts par deux, augmentant sensiblement la viabilité économique de ces projets.
Maturité	Ce sujet demeure insuffisamment étudié. Peu d'avancées concrètes récentes. Un bulletin est en cours de finalisation par la CIGB.
Challenges	Appropriation par les bénéficiaires (impact sur le mode de vie) Gouvernance par les autorités
Où dans le monde ?	Monde entier : partout où l'agriculture a besoin d'eau

3.5 Barrages « à la mer »

Proposer des barrages en mer peut paraître provocateur : les barrages sont déjà critiqués pour leur emprise sur les rivières, et nous voudrions, de surcroît, en implanter en mer, et en particulier sur le littoral, qui recèle des écosystèmes d'une très grande richesse ?

Deux raisons laissent penser que des projets sont possibles, et éventuellement souhaitables. D'abord, certaines zones côtières doivent être protégées et vont devoir être demain encore davantage protégées contre les submersions marines – et pas seulement aux Pays-Bas, qui envisagent actuellement de rehausser leur niveau de protection. Ainsi, des endiguements sont inévitables, et il est utile d'envisager les autres services que ces endiguements pourraient rendre (production ou stockage d'énergie par exemple). Ensuite, certaines zones côtières sont déjà fortement anthropisées ou polluées, par exemple le long de zones industrielles, ports, ou à proximité de centrales thermiques ou nucléaires. Notons par exemple que le projet marémoteur de Swansea Bay avait reçu un accueil favorable d'ONG telles que WWF ou Greenpeace [21].

Les projets de barrages à la mer sont variés. On peut citer :

- Les endiguements de protection côtière, qui délimitent des zones protégées ou polders (actuellement en cours : plan Delta et projets de protection de New-York),
- Les projets de fermeture d'estuaire en crue, avec ou sans pompage associé (Venise, New Orleans),
- Les projets marémoteurs (Swansea Bay au Royaume-Uni ; livre blanc en France), [22],
- La STEP marine, qui peut associer la mer comme bassin bas avec un bassin haut sur falaise (Okinawa au Japon, projet Valhalla au Chili) ou le long d'une falaise ; rentable pour des puissances importantes.

Les innovations portent sur les structures de digues (maîtrise des coûts, impact des emprunts), sur l'association de services (protection contre les submersions – production ou stockage d'énergie), sur l'association avec l'éolien off-shore.

Le principe	1/ Tirer le meilleur parti possible des projets de protection côtière (multiusage). 2/ Implanter des projets à vocation énergétique sur les littoraux déjà anthropisés.
Aspect économique	La justification économique des projets de protection côtière est souvent difficile à trouver, sauf lorsque les zones à protéger sont des villes riches. La production marémotrice peut financer une part substantielle des projets lorsque la marée est suffisante [22]. Les projets de STEP en mer sont viables économiquement lorsque la topographie est adéquate [6]. Les sites sont nombreux.
Quelques chiffres	Les projets marémoteurs de grande ampleur (> 300 MW) ressortent à 100 €/MWh ou moins. Les projets de STEP marine de grande ampleur (de l'ordre de GW) sont estimés à 1,5 M€/MW, ce qui est compétitif.
Maturité	Protection côtière : des expériences à grande échelle de chacune des composantes de ces projets ; mais pas de systèmes intégrant explicitement protection / énergie. Projets marémoteurs et STEP marine : pas de projet récent. De la R&D sur la composante marélienne (marémoteur sous faible marée).
Challenges	CAPEX : projets intensifs en capital. Mesure des effets sur la biodiversité.
Où dans le monde ?	Zones soumises à inondations côtière et d'estuaire ([2]) et zones à potentiel suffisant de marée.

3.6 Remplissage des retenues par pompage

Les retenues actuelles sont presque toutes remplies par gravité, exception faite des bassins supérieurs des STEP. Cela impose de placer les retenues là où la topographie est favorable. Considérer la possibilité de remplir les retenues par pompage élargit considérablement le champ des possibles pour l'implantation de retenues. Cela signifie par exemple que l'on peut imaginer des retenues implantées dans des zones moins riches en termes de biodiversité. Ou que l'on peut alimenter les retenues hors rivières par des pompes. L'obstacle évident est le coût du pompage. Mais quel est ce coût, et quels sont les bénéfices ?

Alimenter une retenue par pompage nécessite de construire la station de pompage et le chemin d'eau associé, puis de payer pour la consommation d'électricité. Les ordres de grandeur de coût actuellement constatés font que, pour un volume donné à stocker, la construction d'un barrage en rivière (avec son évacuateur de crues) est du même ordre de grandeur que la construction d'un seuil en rivière, d'une station de pompage et d'une retenue endiguée construite avec des moyens simples. Ensuite, la consommation d'électricité pèse peu. Ce résultat ne vaut que si on peut effectivement pomper au débit requis un nombre significatif d'heures dans l'année, c'est-à-dire que le régime de la rivière n'est pas trop variable. Alors, le rapport bénéfices / coût peut pencher en faveur de la solution de remplissage par pompage, car les externalités négatives (impact sur l'environnement) sont moins fortes dans le cas du remplissage par pompage.

Références

1. G. Luderer, et al., Environmental co-benefits and adverse side-effects of alternative power sector decarbonization strategies, *Nat. Commun.* 2019;10:5229
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6864079/> (2019)
2. E. Kirezei, I. R. Young, R. Ranasinghe, et al., Projections of global-scale extreme sea levels and resulting episodic coastal flooding over the 21st Century, *Sci Rep* 10, 11629
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-67736-6> (2020)
3. DOE, PNNL, Valuation of Electric Power System Services and Technologies, DOI: [10.2172/1393762](https://doi.org/10.2172/1393762)
4. E. Branche, The multipurpose water uses of hydropower reservoir: The SHARE concept, *Comptes Rendus Physique*, Volume 18, Issues 7–8, Pages 469-478, ISSN 1631-0705, <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2017.06.001> (2017)
5. M. Lino, A. de Bonviller, L. Deroo, Quels barrages pour l'Afrique sahélienne ? What dams for Sahelian Africa? Marseille Symposium "sharing water: multi-purpose of reservoirs and innovations" – to be published (2021)
6. F. Lempérière, A. Nombre, L. Deroo, Dams and the need for more innovation, *International Journal on Hydropower & Dams*, vol. 25 Issue 3 (2018)
7. <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/couts-de-production-de-l-electricite-en-france>
8. A. Quinet, What Value Do We Attach to Climate Action? *Économie et Statistique / Economics and Statistics*, 510-511-512, 165–179
<https://doi.org/10.24187/ecostat.2019.510t.1995> (2019)
9. L. Deroo, C25-Q96-GR - General Report/Rapport Général Q96 /Innovation in the use of dams and reservoirs/Innovation dans l'utilisation des barrages et des réservoirs – ICOLD CIGB 25th Stavanger Congress

10. ECOSYSTEM ECONOMICS (prepared for FAO), “The Economic Value of Water for Agricultural, Domestic and Industrial Uses: A Global Compilation of Economic Studies and Market Prices” (2010)
11. J. J. Opperman, S. Orr, H. Baleta, M. Dailey, D. Garrick, M. Goichot, A. McCoy, A. Morgan, L. Turley, A. Vermeulen, Valuing Rivers: How the diverse benefits of healthy rivers underpin economies, WWF - ISBN: 978-2-940529-87-2 (2018)
12. World Bank Group, ESMAP and SERIS, Where Sun Meets Water: Floating Solar Handbook for Practitioners, Washington, DC: World Bank
<http://documents.worldbank.org/curated/en/418961572293438109/Where-Sun-Meets-Water-Floating-Solar-Handbook-for-Practitioners> (2019)
13. J. Goodenough, Hydrogrid GmbH, Digital Transformation in Hydropower – The ‘smart plant’ of the future
14. A. Koehl, Le stockage hydraulique d’EDF : État des lieux et perspectives pour les enjeux de flexibilité, Colloque « Focus HYDRO » 07/12/2018 (2018)
15. C. Doetsch, B. Droste-Franke, G. Mulder, Y. Scholz, M. Perrin, “Electric Energy Storage” - IEA ECES26 Future Energy Storage Demand (2015)
16. P. Dillon, P. Stuyfzand, T. Grischek, et al., Sixty years of global progress in managed aquifer recharge, *Hydrogeol J* 27, 1–30 <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1841-z> (2019)
17. J. Clérin, et al., Évaluation a posteriori des effets de grandes retenues françaises sur l’environnement socio-économique, CIGB, 18^{ème} congrès, Q69R21
18. IRENA, Innovation landscape brief: Utility-scale batteries, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, ISBN 978-92-9260-139-3 (2019)
19. Y. Sahut, et al., Hydro-solaire : une nouvelle utilisation des réservoirs, Marseille Symposium “sharing water: multi-purpose of reservoirs and innovations”, 2021 – to be published (2021)
20. J. Sheffield, E. F. Wood, M. Pan, H. Beck, G. Coccia, A. Serrat-Capdevila, K. Verbist, Satellite remote sensing for water resources management: Potential for supporting sustainable development in data-poor regions, *Water Resources Research*, 54, 9724–9758 <https://doi.org/10.1029/2017WR022437> (2018)
21. A. Vaughan, Swansea Bay tidal lagoon backed by government review, *The Guardian*, 12 Jan 2017 <https://www.theguardian.com/environment/2017/jan/12/tidal-lagoons-could-ensure-uk-power-supplies> (2017)
22. D. Aelbrecht, C. Le Visage, A. Rabain, L. Deroo, A fresh look at tidal energy, An opportunity for the French territories, *LHB*, 4 (2020) 7-14, DOI: <https://doi.org/10.1051/lhb/2020039> (2020)