Rencontres Business Hydro 2022

Comment réaliser des mix électriques à base d'ENR dans les régions en développement





Sommaire

- ARTELIA, ingénierie engagée dans le développement durable
- Un mix 100% ENR, pourquoi?
- Comment combiner les ENR pour optimiser le mix énergétique
- ENR dans les Pays en Développement: L'histoire est en marche
- Ingénierie: accompagner la transition



ARTELIA, ingénierie engagée dans le développement durable







Bâtimen Industrie

Une ingénierie indépendante & multidisciplinaire

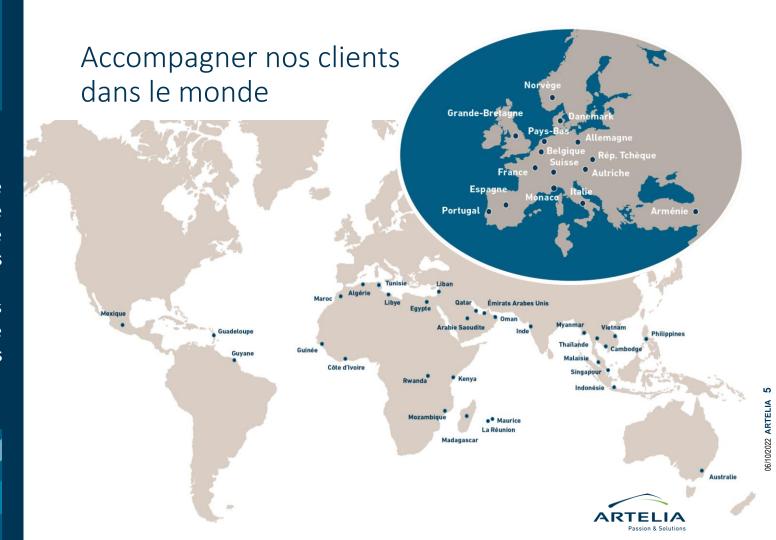
100 % du capital détenu par les collaborateurs





Une présence permanente dans plus de **40 pays**

Des projets dans plus de **100 pays**



En 2021, Artelia a contribué à la réalisation d'environ 24 000 projets d'aménagement dans le monde en apportant des solutions performantes et novatrices, en orientant ses interventions dans le sens des 7 enjeux stratégiques auxquels il entend contribuer.

Créer des solutions pour une vie positive



RÉSILIENCE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Stabilisation du cordon sableux de Grand-Lahou (Côte d'Ivoire)



TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Une plateforme flottante innovante pour exploiter le vent du large (Espagne)



ÉCONOMIE DES RESSOURCES

Living Places: un concept visionnaire de logement (Danemark)



INDUSTRIE AVANCÉE

Reconversion vers le « zéro pétrole » de la raffinerie TotalEnergies de Grandpuits (France)



RENOUVEAU DU BÂTI

Une ambitieuse transformation de bureaux en logements, rue Marcel Dassault à Boulogne (France)



MIEUX VIVRE EN VILLE

Valorisation des canaux de la Métropole de Toulouse (France)



MOBILITÉ MULTIMODALE

Création de la ligne de tramway T9 pour la Métropole de Lyon (France)







- Hydroélectricité
- Energies marines
- Solaire
- Éolien
- Géothermie
- Biogaz

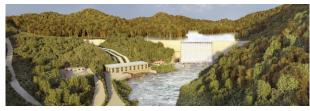
- Nucléaire
- Hydrogène
- Efficacité énergétique
- Réseaux électriques, interconnexions
- Hybridation & stockage



En 2022, ARTELIA contribue à 16 barrages et aménagements hydro en construction en Afrique, Asie et Moyen Orient:

Assistance au maître d'ouvrage ou au bailleur de fond, supervision des travaux

Conception et expertise technique pour les entreprises de construction



Gabon: Kinguele aval
Barrage poids béton 45 m
34 MW
Ingénieur du MO

Uganda: Isimba



Barrage en enrochements 20 m 183 MW Ingénieur du MO



Laos: Nam Ngum IV Barrage BCR 68 m 240 MW Ingénieur du MO



Tanzanie: Julius Nyerere Hydropower project (Rufiji) Barrage RCC 130 m, 2115 MW Consultant pour l'entreprise



Laos: Nam Ngum III Barrage 210 m CFRD 480 MW Ingénieur du MO



Vietnam: Hoa Binh HPP Extension Project

Barrage enrochements 128 m 1920 MW + 480 MW Consultant pour l'AFD



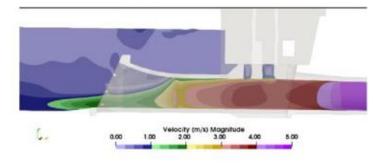
Modélisation numérique et physique

Des outils clés pour la conception des barrages



Modèle de l'évacuateur de crue du barrage de Janneh (Liban) – H = 157 m, Q = 2830 m³/s Modèle: Echelle 1/80 - fond mobile dans la fosse d'érosion

Réduction de l'ampleur des érosions par une optimisation de la cuiller et des dissipateurs



Ecoulement sortant d'une prise d'eau de STEP



Désensablement du canal d'amenée d'Inga I et II sur le fleuve Congo débit turbiné 3600 m3/s, canal de 10 km réalisé dans les années1970 Modèle: Echelles V=1/100 ; H=1/140 – fond mobile

Mise en évidence d'une limitation de débit causée par une excavation insuffisante
 Solutions pour désensabler et maintenir le canal désensablé

Un mix 100% ENR, pourquoi?



Remerciements

Les chiffres utilisés dans cette présentation sont issus notamment de:

- Livre Blanc Tome 2, 2021, chap. 1.1, La filière hydroélectrique dans le mix énergétique mondial, Jean-Marie Martin-Amouroux, Roland Vidil
- Livre Blanc Tome 2, 2021, chap. 1.3, From cost to value, une autre vision de la vision économique de la concurrence entre filières, Dominique Finon
- Livre Blanc Tome 3, 2022, chap. 2.3, Potentiel hydroélectrique exploitable dans les pays en développement, Thierry Badouard et Jean-Marie Martin-Amouroux



Scenario IEA pour limiter l'élévation de la température à 1,5°C

- > Un secteur de l'énergie totalement décarboné en 2050
- > Augmenter les capacités de production hydro de 1340 GW à 2600 GW en 2050

Les ENR contribuent au contrôle du changement climatique et au développement durable:

Faibles émissions de GES:

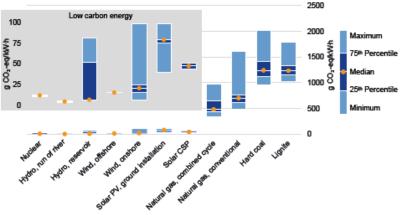
- ENR et nucléaire: 5 à 100 g/KWh
- Charbon, fioul et gaz: 400 à 2000 g/KWh

Faible empreinte en matières non métalliques et fossiles:

- ENR et nucléaire: 35 à 75 g/KWh
- Charbon, fioul et gaz: 200 à 2700 g/KWh

Pas d'avantage clair en empreinte métaux

 Empreinte faible pour hydraulique, nucléaire et biomasse, plus forte pour solaire, géothermie et éolien



Emissions Eq. CO2/KWh (IEA)



Coûts de production hors coûts de réseau

Coût de production compétitifs et baisse des coûts pour le solaire PV

Coût médian, hors coût de réseau en 2019, et évolution depuis 2010:

Eolien terrestre: 39 \$/MWh (-26%)

Hydroélectricité 44 \$/MWh (+27%)

Nucléaire: 50 à 70 \$/MWh

Solaire PV: 57 \$/MWh (-82%)

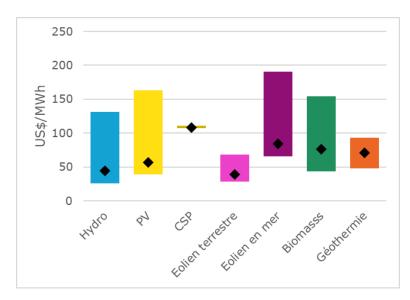
Biomasse: 76 \$/MWh (-13%)

Eolien en mer: 84 \$/MWh

Thermique gaz: 80-100 \$/MWh

Solaire à concentration: 108 \$/MWh

mais les MWh pilotables ont une meilleure valeur d'usage



Coût actualisé de production (Enerdata via IRENA – hors coûts de système) **Des fourchettes de coûts très larges**

les ENR variables entraînent des coûts de réseau supplémentaires

D'après Livre Blanc tome 2, art. 1.3, Une autre vision économique de la concurrence entre filières, Dominique Finon

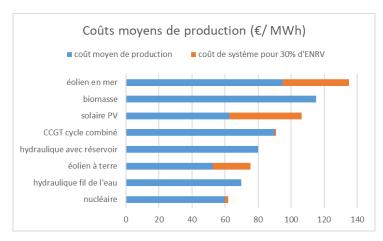
Moyens de production complémentaires pour assurer l'équilibre offre-demande:

- Batteries, hydraulique, turbines gaz à cycle ouvert pour variations rapides,
- Hydraulique gravitaire avec réservoir et STEP à l'échelle journalière, hebdomadaire, voire saisonnière

Coûts de réseau liés à dispersion spatiale des ENRV: Multiplication des lignes de transport

Coûts d'équilibrage instantané: redispatchings locaux

Les coûts de réseau par MWh augmentent avec le taux de pénétration des ENRv



Coût moyen total de productionD'après Livre Blanc tome 2, art. 1.3





Passion & Solutions

« Mix énergétique » à l'échelle d'un territoire

« Hybridation » à l'échelle d'une système

Coupler les ENR avec leurs qualités et leurs limites

	Hydraulique	Solaire	Eolien	Biomasse
Partage des usages	Tourisme, alimentation en eau, irrigation			Cuisine, chauffage, alimentation, bois de construction, électricité, chaleur, biocarburants
Variabilité de la ressource	Variation saisonnière, atténuée si réservoir	Cycle jour/nuit	conditions météorologiques	Suivant disponibilité matière
Contribution à l'équilibre des réseaux	Pilotable, stockage si réservoir ou STEP	non	non	pilotable
Contribution à la stabilité des réseaux	Synchronisée au réseau, inertie	non	non	Turbine synchronisée au réseau, inertie



Exemples de combinaisons gagnantes...

- A l'échelle journalière:
 - Privilégier la production solaire en journée
 - Eau stockée dans la retenue d'eau pour turbiner en heures de pointes où la production sera mieux valorisée
- Stocker l'énergie produite par les ENR intermittentes
 - > STEP: pomper l'eau avec l'énergie produite par les ENR intermittentes, turbiner aux heures de pointe ou de faible production intermittente (nuit, absence de vent)
- Territoires non interconnectés sans potentiel hydro: Solaire + batteries ou groupes diesel, solution courante en Afrique.



Le défi de la stabilisation des réseaux

■ La part des énergies variables et non synchronisées au réseau ne peut pas dépasser une certaine limite:

intermittence <-> stockage et hybridation avec d'autres énergies pilotables

- **■** Production et stockage par l'hydro lorsque possible:
 - Hydroélectricité gravitaire -> ressource en eau et du relief
 - ❖ Stockage hydroélectrique -> du relief avec ou sans ressource en eau (barrages hydroélectrique ou STEP en circuit fermé)
- Optimum économique: Thermique et gaz en complément des ENRv pour de courtes périodes (nuit, périodes sans vent) pour ne pas sur-dimensionner le stockage
- Pilotage du réseau efficace pour optimiser la combinaison des énergies et gérer la variabilité

Stockage: Deux solutions concrètes pour des usages différents







Tesla Victoria Big Battery, Australie - Neoen 300MW/450MWh (equiv. 1,5 h)

212 modules Tesla Megapack 7,2 x 1,6 x 2,5 m
Emprise : #11000 m² (stade de football) en plaine
Construction 10 mois
Durée de vie 20 ans
Financement 160 M\$ (0,36 M\$/MWh stocké)

STEP Abdelmoumen, Maroc – ONEE 350 MW/1750 MWh (equiv. 5h)

2 bassins 1,3 Mm³ avec géomembrane, 2 km de conduite forcée et galeries diam. 3,6 à 4,8 m, Usine en puits, 2 groupes réversibles, chute 575 m

Emprise: #260 000 m² (bassins + CF + usine) montagne

Construction 4,5 ans

Durée de vie # 50 ans +

Coût construction 284 M€ (0,16 M€/MWh stocké)

Beaucoup d'autres critères à considérer dans une comparaison



Impliquer les populations, minimiser les impacts

- Partage des usages: hydraulique, biomasse
- Management environnemental et social:
 - Référentiels: IHA, bailleurs de fond (Banque Mondiale...),
 - > Consultations des hommes et des femmes dans la zone impactée
 - Accompagner tout le cycle du projet: des études à la réalisation
- Développement durable et changement climatique:
 - Référentiels: Green Climate Fund....
 - G-res: Calcul des émissions de GES des reservoirs (IHA & UNESCO Chair in Global Environmental Change.
 - **Eco-conception, économie circulaire**



ENR dans les PED: L'histoire est en marche



2019: 25% d'ENR dans les Pays en Développement

Régions en Développement assimilées à Afrique, Asie Océanie, Amérique Latine

Production électrique en 2019 (TWh) en Afrique, Amérique latine, Asie Océanie								
	Total	Thermique charbon	Hydraulique	Thermique gaz	Autres dont biomasse	Nucléaire	Eolien	Solaire
Asie Océanie	12453	7213	1847	1438	431	651	494	380
		58%	15%	12%	3%	5%	4%	3%
Amérique latine	1640	99	729	442	210	36	95	27
		6%	44%	27%	13%	2%	6%	2%
Afrique	851	252	138	345	78	14	16	9
		30%	16%	41%	9%	2%	2%	1%
Total	14944	7565	2715	2225	719	701	605	416
	100%	51%	18%	15%	5%	5%	4%	3%
Total monde	27002	9814	4397	6365	1511	2796	1425	694
	100%	36%	16%	24%	6%	10%	5%	3%

Hydraulique: 16% de la production électrique mondiale, 15-16% en Afrique, Asie Océanie, 44% en Amérique latine,

Eolien: 5% de la production électrique mondiale, 2-6% dans les pays en dévt.

Solaire: 3% de la production électrique mondiale, 1-3% dans les pays en dévt.

Biomasse: 1,5% de la production électrique mondiale

Des objectifs affirmés

Maroc, 52% d'ENR en 2030:

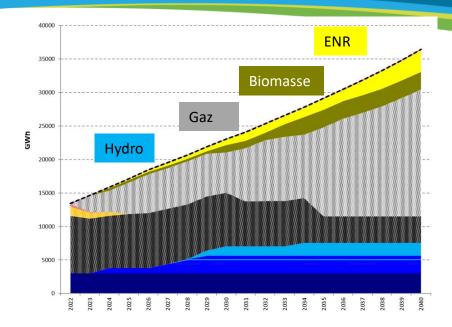
hydro existant + 4 GW éolien et solaire, STEP pour stockage

Egypte, 42% d'ENR en 2035:

2,8 GW hydro existant, 43 GW solaire et
 18 GW éolien, STEP pour stockage.

Mali, passer de 5% à 38% d'ENR en 2030

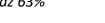
Plan Solaire Tunisien, passer de 3% à 30% d'ENR en 2030 (production)



Etude du Plan Directeur des Ouvrages de Production et Transport d'énergie électrique de la Côte d'Ivoire pour la période 2020-2040 (ARTELIA)

Enjeu clé : intégration des énergies renouvelables et indépendance énergétique

Exemple de scénario (% production): Hydro 20% + ENRv 10% + Biomasse 7% Gaz 63%



Ingénierie: accompagner la transition

Le cas d'ARTELIA



Hydroélectricité et Energie, des activités historiques

- 1920: Premier modèle physique d'un ouvrage hydroélectrique (Drac-Romanche)
- 1955: Création de Sogreah, émergence de l'activité barrages et aménagements hydroélectriques tournée vers les pays en développement
- 1970: Elargissement vers minicentrales en France et transport d'électricité dans les pays en développement.
- 1991: Premier Plan directeur de production et transport d'électricité (RCA)
- 2001: Etude du potentiel éolien off-shore entre Dunkerque et Nantes
- **2007: SERT rejoint Sogreah,** spécialité mini-hydro et ENR, Lyon
- **2010: ARTELIA, unité Eau Environnement Energie** (Grenoble et Lyon)
- 2015: Rénovation des outils de planification pour intégrer les ENR variables
- **2014: Etudes de planification 100% ENR en zones non interconnectées**



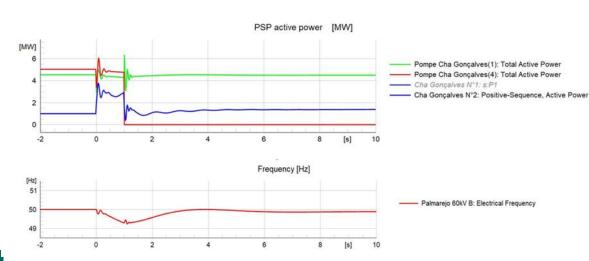
Nouveaux projets -> nouveaux outils et services

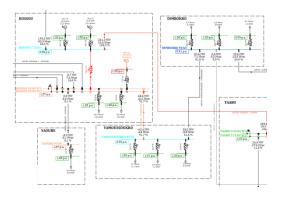
- Mix électriques des collectivités et territoires isolés: Etudes 100% ENR
 - > Approche et logiciels développés par ARTELIA
- Planification de la production et du transport d'électricité dans les réseaux:
 - Prise en compte des ENRv: Rénovation des logiciels ARTELIA (HILLMIX & HILLDEV + HILLPLAN, PVsyst, RETScreen)
- Projets de STEP en lien avec le développement des ENR:
 - Faisabilité: Equilibrage et stabilité des réseaux avec ENR variables et STEP
 - > Accompagnement des maîtres d'ouvrage et des entreprises dans la réalisation
- Hybridation PV et hydro: PV flottant
- Energie et développement durable dans d'autres métiers: Digestion des boues et cogénération (station de traitement des eaux usées d'Alexandrie Est)

Analyse statique et dynamique des réseaux électriques

Logiciel PowerFactory

- Simulations de flux et de défauts dynamiques
- Modules pour différentes productions électriques
- Exemples de scenarios: chute rapide d'une production éolienne, perte d'une unité de production ou de pompage, perte de ligne électrique







Depuis les années 2010: Nombreux projets de STEP en accompagnement des ENR intermittentes

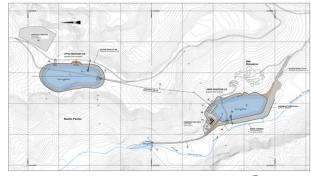
- Israël, Kokhav Hayarden (340 MW): Accompagnement du groupement EPC en phase offre, études hydrauliques, étanchéité drainage des bassins (2014-15)
- Israël, STEP Gilboa (300 MW): conception des tunnels, étude dynamique du génie civil de la centrale (2013-2015)
- Maroc, STEP Abdelmoumen (350 MW): Consultant général pour Vinci en phase offre puis réalisation, hydraulique, étanchéité drainage des bassins, étude dynamique génie civil de la centrale
- Oman, STEP marine (30 MW): Etude faisabilité pour un développeur (2016-17)
- Egypte, STEP d'Attaqa (2400 MW): Ingénieur du maître d'ouvrage Ministère énergie / HPPEA, depuis 2017
- Emirats Arabes Unis, STEP Hatta (300 MW): client Strabag en phase offre puis réalisation, études hydrauliques, modélisation physique et numérique, études d'exécution, maquette numérique, assistance durant la construction (depuis 2018)
- Tunisie, STEP Zagua (400 MW): Assistance à l'AFD, revue de l'étude de faisabilité (2019-21)

STEP sur l'île de Santiago (Cap Vert)

Client: Luxembourg Agency for Development

- Production actuelle: groupes diesel
- Objectif 50% ENR en 2030: 60 MW solaire + 30 MW éolien + stockage
- Du relief mais faible ressource en eau: STEP en circuit fermé, dérivation des crues pour premier remplissage
- STEP de 20 MW / 8h et groupes diesel pour appui de courte durée pour ne pas sur-dimensionner le stockage.
- Forte pression sur l'utilisation des terres : bassins artificiels hors cours d'eau, emprise réduite
- Conception simple et flexible: Pas de groupes réversibles prototypes, 2 Pelton 10 MW et 4 pompes de 5,5 MW
- Cadre réglementaire mal adapté: Aménagements proposés pour permettre l'implémentation d'une STEP

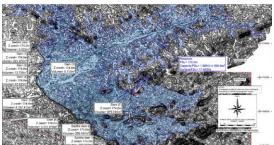


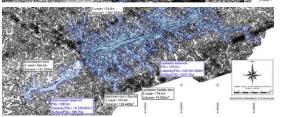




Hybridation hydro-solaire, compromis entre production et impacts : Centrale SP2, rivière Saint Paul (Libéria)

- Schéma initial: retenue vers RN 161, 150 MW, garanti 32.6 MW
- Forte variabilité des apports: Débit moyen mensuel 67 à 1305 m³/s
- Etude pour RN entre 150 et 170: Forts impacts E&S et risques géotechniques plus importants pour RN170
- **■** Phasage optimum en cascade:
 - Phase 1: centrale aval RN150, 107 MW (base), garanti 17 MW
 - Phase 2: centrale aval + amont RN170, total 180 MW (pointe), garanti 67 MW
 - > Réduction des impacts E et S et des risques géotechniques
- Pour le même investissement en phase 1 (552 M\$), combinaison centrale aval 107 MW (416 M\$) + solaire PV 145MW et batteries 16 MW





Réservoir centrale SP2 Solution de base et cascade

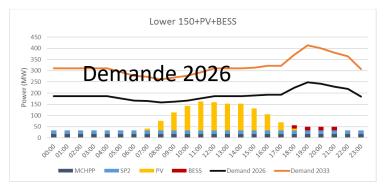


Hybridation hydro-solaire, compromis entre production et impacts : Centrale SP2, rivière Saint Paul (Libéria)

En phase 1 pour l'investissement prévu initialement...

- Production annuelle (base) légèrement réduite: -7%
- Même puissance garantie à 90% pendant 4 h: 33 MW
- Les batteries décalent une partie de la production PV vers les heures de pointe
- Meilleure production en saison sèche: +15%
- Réduction des impacts E&S

	Schéma initial RN161	centrale aval RN 150	PV + batteries	total système hybride
Investissement	552 M\$	416 M\$	136 M\$	552 M\$
			145 MW PV	
Puissance installée	148 MW	107 MW	16 MW batteries	222 MW
Production annuelle	815 GWh	588 GWh	171 GWh	759 GWh
facteur de charge	63%	63%	13%	39%
Puissance garantie (90% 4h)	32.6 MW	16.9 MW		32.9 MW
production en février (étiage)	23.4 GWh	11.8 GWh	15.2 GWh	27.0 GWh



Production journalière en saison sèche







www.arteliagroup.com