

Dans cet article, les auteurs réalisent une performance puissante au niveau du fond. Texte cohérent et clair. Base solide, pertinence des références et bon usage de celles-ci. Excellente maîtrise d'un sujet de grande envergure. Capacité d'analyse appropriée pour le niveau du cours. Rigueur dans l'argumentation. Le seul hic sont les Figs et Tabs non cités, présentés et discutés. Aussi, le lien à faire entre production maximal à 30o et choix de production à 40o en PV. La référence à une Figure 4 pose problème. Les références sont peu scientifiques en termes d'articles de fond. Mais la majeure partie de la critique (qui fait perdre des points) vient du format. Un excellent premier jet d'article par ces auteurs.

Séminaire scientifique et technique
Énergies renouvelables
École de technologie supérieure
Avril 2021, Montréal, Québec

2021-1-ENR810-11 

LA STEP EN CORSE POUR UNE ÉLECTRICITÉ 100% RENEUVELABLE ET NON INTERMITTENTE

Gaspard JULIER (20%)

École de technologie supérieure
JULG02119804
gaspard.julier.1@ens.etsmtl.ca

Paul GUDIN (20%)

École de technologie supérieure
GUDP19089802
paul.gudin.1@ens.etsmtl.ca


Quentin ALARY (20%)

École de technologie supérieure
ALAQ29049805
quentin.alary.1@ens.etsmtl.ca


Nolwen STÉPHAN (20%)

École de technologie supérieure
STEN17589802
nolwen.stephan.1@ens.etsmtl.ca

Hugo AZIN (20%)

École de technologie supérieure
AZIH16079704
hugo.azin.1@ens.etsmtl.ca 

RÉSUMÉ



En 2014, l'île de l'archipel des Canaries, El Hierro, a inauguré sa centrale hydro éolienne lui permettant d'être la première île autonome en énergie. Depuis, ce modèle s'exporte sur d'autres petites îles d'une dizaine de milliers d'habitants, mais aucun projet à plus grande échelle n'a encore été conçu. Cet article présente ainsi une solution de mix énergétique permettant d'avoir en Corse une électricité issue à 100% d'énergie renouvelables. Le mix énergétique optimisé est alors de 55% de photovoltaïque, 26% d'éolien et 19% d'hydroélectricité. La STEP associée à ce mix permet d'avoir une capacité de stockage saisonnier de plus de 220 GWh. Le LCOE total est de 87 €/MWh mais ce prix est sous-évalué car il ne tient pas compte de l'insularité de la Corse. Seules des  allations de PV et d'éolien sont utilisées ici mais d'autres peuvent être envisageables, comme la biomasse par exemple. Cette étude n'a pas la prétention d'aborder tous les enjeux sociétaux et environnementaux qu'auraient un tel projet.

Mots-clés : Corse, autonomie énergétique, mix énergétique, STEP

NOMENCLATURE

Symboles utilisés

ENR : énergie renouvelable
PV : Photovoltaïque
STEP : Station de transfert d'énergie par pompage

 AUE : Agence d'Aménagement durable, d'Urbanisme et d'Énergie de la Corse
PPE : Programmation pluriannuelle de l'énergie 

OREGES : Observatoire Régional de l'Énergie et des Gaz à Effet de Serre de Corse

INTRODUCTION

Dans le cadre des actions contre le changement climatique, l'autonomie énergétique des zones insulaires est un concept qui séduit les élus locaux ces dernières années. El Hierro, la plus petite île de l'archipel des Canaries, en est la pionnière et d'autres petites îles autour du globe suivent cette tendance. En revanche, la Corse est la première île de plus de 100 000 habitants à montrer sa volonté d'en faire autant.

Actuellement, la Corse est contrainte d'importer de l'énergie pour répondre aux besoins de ses habitants. D'après le rapport de l'AUE sur les données obtenues par l'OREGES [1], pour tout type d'énergies confondu, la part d'importation représentait 87% du mix énergétique de la l'île en 2017, et 30% du besoin en électricité par interconnexion avec l'Italie

continentale et la Sardaigne. À l'avenir, la région Corse souhaite ainsi réduire cette part de dépendance énergétique.

En 2017, l'île produisait 26% de son électricité grâce aux ENR [1], principalement avec une grande part d'hydroélectricité. Cependant, la majeure partie de la production d'électricité était assurée par des centrales thermiques à fioul lourd et léger qui en représentaient 44% [1].

Afin de remplacer les centrales thermiques par des ENR, l'ajout d'une solution de stockage est nécessaire pour compenser leur production intermittente et ainsi répondre aux besoins variables de la Corse. Aujourd'hui, le stockage par pompage turbinage est la technologie la plus mature permettant de stocker une grande quantité d'énergie. Dans l'article de Pierre-Louis VIOLLET sur la STEP [2], on retrouve que la puissance installée mondiale en 2010 atteignait les 140 GW avec

des installations de puissance maximale de 3GW pour la station de Bath County aux États-Unis. Les réservoirs supérieurs de stockage peuvent atteindre les 100.10^6 m³ de volume utile (132.10^6 m³ pour le réservoir de la station de Grand Maison en France par exemple).

Le but de cette étude est de déterminer dans quelles mesures est-il possible que la Corse soit autonome en énergie électrique grâce aux énergies renouvelables couplées avec un système de stockage par pompage turbinage.

Le travail se limite à l'étude systémique et une brève analyse économique sera conduite. Différents enjeux sociétaux sont volontairement ignorés ou minimisés afin de faciliter l'étude, ils seraient cependant à prendre en compte dans une étude de faisabilité plus poussée.

Afin de clarifier la situation actuelle de la Corse et le cadre de ce travail, une première partie est consacrée au contexte énergétique de l'île ainsi qu'aux hypothèses générales et limitations de l'étude. Ces données permettent alors de proposer un mix d'énergie électrique 100% renouvelable. Pour cela, les potentiels éolien et solaire sont préalablement estimés avant que les installations soient dimensionnées. La solution de stockage par pompage turbinage est ensuite analysée. Une partie d'analyse des résultats et commentaires, un point de vue économique vient finalement clore l'étude.



CONTEXTE DE L'ÉTUDE

ÉTAT DES LIEUX ÉNERGÉTIQUE DE LA CORSE

L'engagement du gouvernement

Dans une dynamique de réduction des émissions de gaz à effet de serre et afin d'assurer la sécurité d'approvisionnement énergétique de l'île, le premier ministre français en 2015 a signé un décret [3] instaurant une programmation pluriannuelle de l'énergie en Corse [4]. Parmi les objectifs de cette programmation, le principal sera de réduire l'utilisation de combustibles fossiles et de développer en parallèle les ENR. Des solutions d'ENR thermiques sont envisagées, mais aussi électriques en prévoyant une augmentation des ENR intermittentes de +38% d'ici à 2023 par rapport à la production de 2015 [4]. Ces efforts doivent ensuite être poursuivis pour atteindre de plus gros objectifs pour 2030 et ainsi espérer une autonomie énergétique de l'île à l'horizon 2050 [5].

La production et consommation d'électricité

L'énergie hydroélectrique est la principale ENR installée en Corse, elle représentait 17% de la production en 2017 [1]. Depuis la construction de la dernière centrale en 2012, on comptabilise 199MW installé pour la grosse hydroélectricité sur les 395,5MW d'ENR [1].

La figure 1 présente la production d'électricité des ENR en Corse au cours des dernières années.

Dans les parties suivantes, à l'exception de l'hydroélectricité, les productions des ENR déjà installées ne seront pas prises en compte. Une moyenne mensuelle de la

production hydroélectrique Corse sur les cinq dernières années est considérée pour l'étude du mix énergétique.

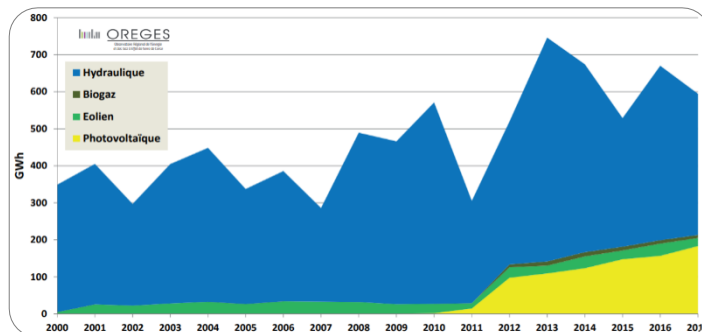


Figure 1 : Production d'électricité par les ENR en Corse depuis le début du siècle. [5]

La consommation annuelle d'électricité en Corse était d'environ 2,3GWh en 2018 et 2019 d'après le site d'open data d'EDF [6].

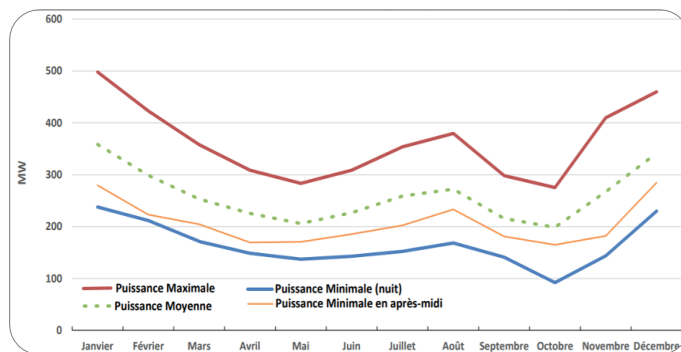


Figure 2 : Puissance appelée sur le réseau Corse en 2017 [5]

D'après la figure 2, la puissance maximale appelée sur le réseau en Corse est de 500MW. Les dimensionnements seront faits pour y répondre dans le pire cas, c'est-à-dire lors d'une météo nuageuse et sans vent.

HYPOTHÈSES ET LIMITATIONS

Les technologies présentées plus bas sont celles qui sont aujourd'hui les plus matures et dont leurs potentiels énergétiques est le plus élevé pour la Corse. En ce sens, les potentiels PV, éolien et la solution de stockage par STEP ont été étudiés.

Une liste non exhaustive d'enjeux environnementaux et sociétaux est considérée. Concernant la localisation des installations proposées, le critère de raccordement au réseau est pris en compte mais n'est pas limitant, et on suppose qu'en dehors des espaces urbains et des parcs naturels, il est possible de les implanter. Finalement, l'étude est réalisée sans projection de l'évolution de la consommation dans les années à venir, l'augmentation de population et de la consommation électrique est donc omise. Toutes ces considérations seraient évidemment à prendre en compte dans une étude de faisabilité plus poussée.

Avant de faire une proposition de mix énergétique et de système de stockage, les potentiels de production par énergie PV et éolienne sont définis.

LES POTENTIELS ÉNERGÉTIQUES

POTENTIEL SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

Cette partie de l'étude permet de déterminer si le projet est réalisable. Depuis 2009, une charte a été imposée concernant les projets photovoltaïques en Corse [8], dans laquelle plusieurs critères doivent être respectés. Dans la poursuite de l'étude, les critères pris en compte sont les critères environnementaux et urbains.

Calcul de surface foncière

La surface foncière est déterminée grâce à la superposition de différentes cartes représentant les contraintes environnementales de la Corse [9], ainsi qu'en prenant en compte l'occupation du sol en milieux urbains [10] [11]. En considérant ces contraintes (en rouge sur la figure 3), la superficie foncière installable pour le PV est de 462 000 ha.

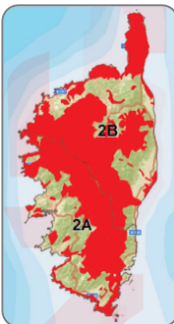


Figure 3 : Zones interdites pour le PV


Nombre de panneaux installables

D'après la charte [8], les panneaux représentent un tiers de la surface foncière. En optant pour des panneaux de 400 Wc, 2m² de superficie, qui sont ceux utilisés le plus fréquemment dans les centrales au sol, le nombre de panneaux installables est de 770 millions.

Paramètres de simulation


Les relevés météo utilisés sont ceux de la ville d'Alghero, à environ 170 km du centre de la Corse en Italie, dont l'irradiation solaire sur l'année est semblable à celle de la Corse.

Les autres paramètres de simulation considérés sont basés sur d'anciennes simulations de même envergure. Les panneaux sont de type « Standard » sans tracker, avec une orientation plein sud et une perte de système de 20%

L'angle d'inclinaison optimal de 30° est obtenu après plusieurs simulation sur le logiciel PvWatt dont les résultats sont présentés figure 2. 

Calcul du potentiel solaire PV

D'après la simulation PvWatt, pour le type de panneaux choisi et la surface foncière disponible, il est possible de produire 334TWh en Corse en respectant les contraintes environnementales et urbaines soit 150 fois la consommation de la Corse.

Le potentiel PV est amplement suffisant pour répondre à la consommation de la Corse. Cependant, cette énergie étant intermittente, le potentiel éolien doit lui aussi être déterminé pour la compléter. 

POTENTIEL ÉOLIEN

Calcul de la surface foncière

La méthode de calcul du potentiel éolien est sensiblement la même que celle du photovoltaïque. L'espace disponible pour l'installation des éoliennes est d'abord calculé selon des critères stricts énumérés par Le préfet régional de Corse [12]. Le schéma régional de Corse reprend les éléments suivants : le gisement éolien (placé à 4 m/s à 50m d'altitude), le raccordement électrique, l'impact sur le patrimoine et le paysage ainsi que les milieux naturels [13]. La surface exploitable obtenue (en vert sur la carte de la figure 4) est de 940,5 km² (sur les 8722 km² de la Corse) [Annexe 1].

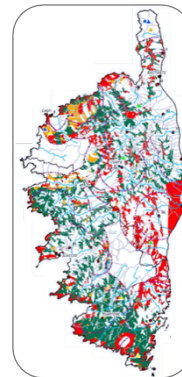


Figure 4 : Zones disponibles pour l'éolien

Choix de l'éolienne

L'éolienne retenue est choisie suivant deux critères : l'année de mise en service et sa vitesse de démarrage. En 2019, le parc éolien d'Espiers dans le département de l'Eure-et-Loir a installé 5 turbines de la marque Allemande Nordex N117/3600 [14] d'une puissance de 3,6 MW. Hautes de 90m, elles possèdent un rotor de 116,8m de diamètre et peuvent démarrer à une vitesse de 3 m/s [15]. Le choix s'est donc porté sur cette éolienne [Annexe 2].

Espace occupé par une éolienne

Dans une zone où le vent est majoritairement unidirectionnel, il est préférable de considérer un espace transversal de 5D entre les éoliennes et 10D dans direction du vent (D = diamètre du rotor). Chaque éolienne occupe ainsi entre 0,4 et 0,7 km². Une surface unitaire de 0,64 km² est alors considérée [16].

Données météo

Les données météo du site meteoblue.com rassemblent la vitesse du vent à 80m de haut entre 2015 et 2020 sur trois sites de la Corse [17]. La puissance générée par l'éolienne peut alors être calculée selon ses caractéristiques de puissance apportées par le site wind-turbines-model.com [15].

Potentiel éolien


Le potentiel éolien de la Corse est ainsi calculé à partir de toutes ces données : au total 1469 éoliennes Nordex N117 peuvent être installées, soit une puissance nominale totale de 5288MW et une production annuelle moyenne de 17,2 TWh/an. Une valeur bien évidemment aberrante devant la consommation totale de la Corse. Ces potentiels PV et éolien étant suffisants, il faut maintenant les répartir dans le mix énergétique.

MIX ÉNERGÉTIQUE


OBJECTIFS DU MIX ÉNERGÉTIQUE

Premièrement, il faut déterminer le besoin auquel doit répondre le mix énergétique. Il est déjà composé de 200 MW de barrages hydroélectriques produisant 426 GWh par an. Le but

premier du mix est d'arriver à compléter la production d'énergie hydraulique pour subvenir à la consommation annuelle de la Corse. C'est-à-dire, obtenir sur l'année le même volume d'énergie produit que d'énergie consommée.

Secondement, le choix est fait d'étudier la production et la consommation mois par mois. Ce n'est pas un problème si certains mois ont une balance énergétique positive et d'autres négative, la variation entre les mois sera comblée par la STEP. Pour un mois avec une balance positive, la STEP consomme le surplus d'électricité pour monter l'eau. Et pour les mois avec une balance négative, le déficit d'énergie électrique est compensé par le turbinage de l'eau stockée.  résumé, le PV et l'éolien permettent d'avoir un équilibre entre la production et la consommation sur l'année tandis que la STEP garantit l'équilibre entre les mois. Plus le déséquilibre entre les mois est grand, plus les réservoirs (amont et aval) de la STEP sont grands. Ceci est problématique car il faut au contraire réduire la taille de la STEP (contraintes géographiques, gros enjeux sociaux, pertes de stockage non négligeables et coût d'installation important).

IMPACTS DU PV ET DE L'ÉOLIEN SUR LE MIX ÉNERGÉTIQUE

Le plus gros inconvénient du PV est la grande disparité de production sur l'année. Comme le montre la figure 5, la production est beaucoup plus élevée en été qu'en hiver. Pour lisser la balance énergétique, les panneaux photovoltaïques auront une inclinaison de 40°  d'avoir un peu plus de production l'hiver sans en perdre beaucoup sur toute l'année. En revanche, le PV possède de nombreux avantages comme de nombreux sites disponibles, une forte densité énergétique de 710MWh/ha par an et des enjeux sociaux faibles.

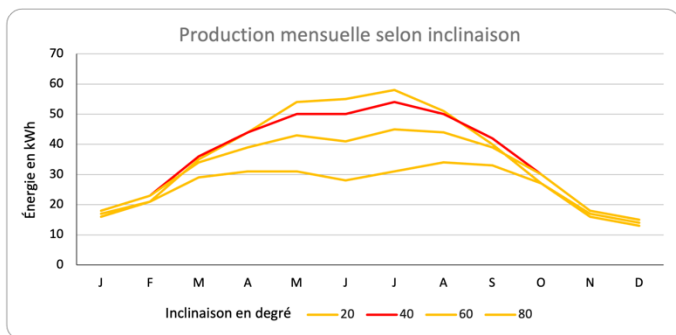


Figure 5 : Production PV mensuelle selon plusieurs inclinaisons

L'énergie éolienne présente trois inconvénients majeurs. La production est très variable et peu prévisible, la densité énergétique est faible (190 MWh/ha par an) et les enjeux sociaux sont très importants. À l'inverse, elle présente un avantage non négligeable : la production montrée en figure 6 est en phase avec la consommation et en déphasage avec la production PV. L'utilisation des éoliennes dans le mix ne doit donc pas être exclue pour obtenir une STEP de stockage raisonnable.

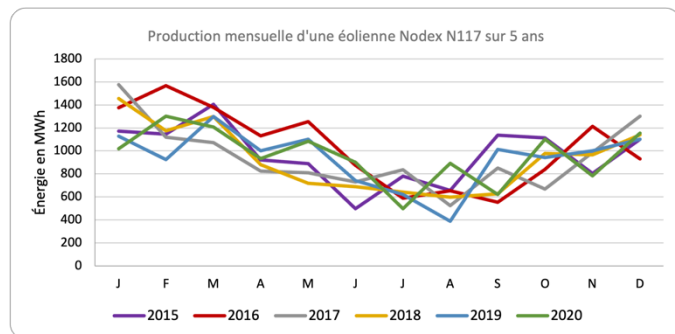


Figure 6 : Production mensuelle de l'éolienne Nordex N117 sur 5 ans

DÉTERMINATION DU MIX ÉNERGÉTIQUE

Plus la part de PV est grande dans le mix énergétique, plus la capacité de stockage de la STEP doit être grande, et moins la surface foncière dédiée au PV et aux éoliennes est grande. Tandis que, plus la part d'éolien est grande, plus les réservoirs de la STEP sont petits mais on sait que la production éolienne est peu fiable. Il faut donc trouver un juste milieu. Ici, avec tous les arguments précédents, le mix a été fixé à 55% de PV, 26% d'éolien et 19% d'hydroélectricité (cette part du mix était déjà déterminée car ce sont des installations existantes). On obtient alors, figure 7, l'énergie produite selon la source mensuellement.

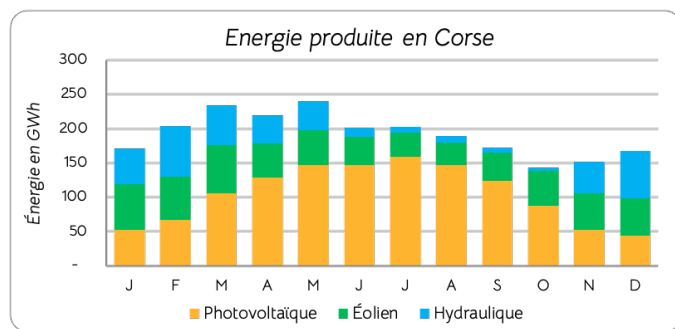


Figure 7 : Énergie produite selon la source

Le mix énergétique étant maintenant fixé, il est possible, à partir des données de production des parties précédentes calculer un nombre de 2 935 583 panneaux PV et de 50 éoliennes. Ce qui correspond à des surfaces foncières de respectivement 1 779 ha et 3222 ha. Ces surfaces sont bien inférieures aux surfaces maximales déterminées dans les parties précédentes.

INFLUENCE DU MIX SUR LA STEP

L'objectif était dans un premier temps de chercher à avoir une balance consommation/production nulle sur l'année. Or, il faut tenir compte des pertes dues au stockage de la STEP (non négligeables vu les volumes d'énergie en jeu ici). Le calcul de la production supplémentaire nécessaire sera fait dans une prochaine partie (les pertes dues au pompage turbinage étaient trop compliquées à mettre dans les graphiques).

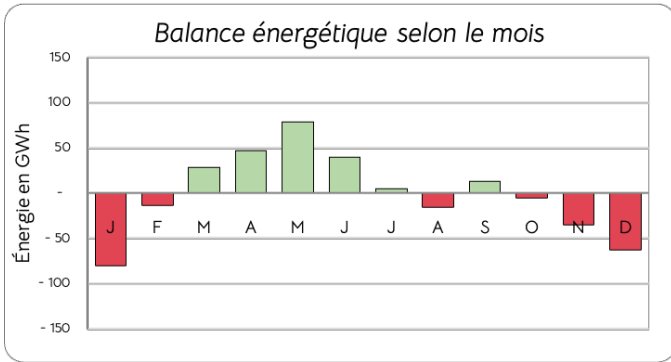


Figure 8 : Balance énergétiques mensuelles

Le mix étant fixé, il est maintenant possible de calculer la quantité d'énergie que la STEP va devoir injecter annuellement sur le réseau, afin de répondre à la différence temporelle entre la production et la consommation. Pour cela il faut simplifier le schéma figure 8 des balances consommation/production mensuelles en considérant grossièrement qu'il y a 6 mois positifs consécutifs et 6 mois négatifs consécutifs. La quantité d'énergie que le stockage doit réinjecter sur le réseau est donc la somme des balances des mois négatifs (qui est d'ailleurs égale à la somme des mois positifs car il a été visé une balance nulle sur l'année).

212 GWh d'électricité doivent être produits par la STEP. Le rendement de turbinage d'une STEP classique est de 98% [7], donc le réservoir amont doit pouvoir stocker 217 GWh (de même que le réservoir aval). Le rendement de pompage est, quant à lui, de 75% [7], il faut donc fournir 289 GWh d'énergie électrique à la STEP pour qu'elle réinjecte 212 GWh, ce qui engendre 67 GWh de pertes annuelles. Comme mentionné précédemment, ces 67 GWh n'ont pas été prévus dans le mix initial, il faut donc ajouter 106 000 panneaux PV et 2 éoliennes (en respectant la répartition du mix) pour absorber cette surconsommation.

INSTALLATION DE LA STEP

La STEP permet de compléter la production des ENR. Elle stocke de l'énergie par gravité en pompant de l'eau et la redistribue en fonction de la production des ENR grâce à des turbines.

PUISSANCE ET CAPACITÉ REQUISES DE LA STEP

La puissance de production électrique est déterminée en se plaçant dans le cas où ni les panneaux solaires, ni les éoliennes ne produisent d'énergie. Le pic de puissance appelé étant de 500 MW, en lui soustrayant les 200 MW de production hydraulique pilotable, il faut alors pallier un manque de 300MW.

L'énergie devant être stockée par la STEP a été définie dans l'étude du mix énergétique. Ainsi, les caractéristiques requises pour la STEP sont résumées dans le tableau 1.

Puissance	300 MW
Énergie	217 GWh

Tableau 1 : Caractéristiques requises pour la STEP

LOCALISATION DE LA STEP

L'outil GéoPortail à l'aide de son analyse du relief a permis de trouver un lieu potentiel pour une STEP. Le lieu, entouré en rouge sur la figure 9, a par la suite été analysé afin de vérifier qu'il remplissait bien les conditions de 300MW de puissance et de 217 GWh d'énergie.



Figure 9 : Localisation de la STEP

PROPRIÉTÉS REQUISES DE LA STEP

L'emplacement trouvé permet d'avoir un bassin supérieur à une altitude de 1600m et un bassin de 650m dans la vallée à l'arrière. Cet emplacement permet donc d'avoir une hauteur de chute de 950m. Pour respecter les 300 MW de puissance, un débit de 40 m³s⁻¹ a donc été fixé. Concernant l'énergie stockée, le volume d'eau a été retrouvé l'aide de la formule : $E = mgz$, donnant un volume minimal de 83 millions de m³ d'eau.

Le tableau 2 récapitule les caractéristiques pour une STEP avec une hauteur de chute de 950 mètres.

Débit	40 m ³ s ⁻¹ .
Volume d'eau minimum	83 millions de m ³

Tableau 2 : Caractéristiques minimales de la STEP

VÉRIFICATIONS DES CONDITIONS

Pour estimer la quantité d'eau dans la STEP, le volume a été approximé par une ellipsoïde ce qui a permis de trouver 104 millions de m³ d'eau. [Annexe 1] Le volume d'eau est représenté sur la figure 10.



Figure 10 : Profil altimétrique du lieu d'implantation

On dimensionne le bassin inférieur de telle sorte qu'il puisse accueillir 104 millions de m³ d'eau.

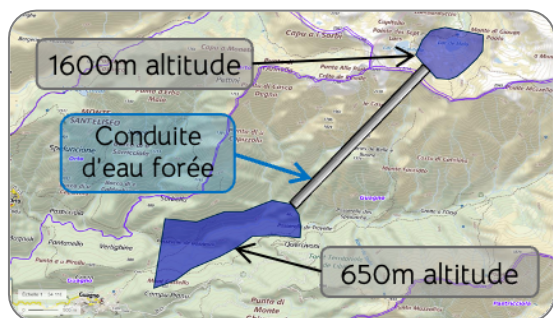
Ainsi, cet emplacement de STEP respecte les conditions émises en termes de puissance (300MW) et de stockage d'énergie (plus de 217GWh).

CARACTÉRISTIQUES DE LA STEP

La STEP représentée sur la figure 11, utilisera 4 turbines de chute type Pelton pour maximiser le rendement et pouvoir ajuster les puissances requises entre 0, 75, 150, 225 et 300 MW. Cela permettra de réguler sa puissance mais aussi de pouvoir fonctionner à une puissance suffisamment importante pendant la maintenance d'une des turbines.

Elle utilisera huit turbines Francis pour remonter l'eau par pompage au bassin supérieur. [18]

Figure 11 : Bassin inférieur et supérieur de la STEP



DISCUSSION

Dans cette analyse, le phénomène de l'évaporation n'a pas été pris en compte. Les lacs formés par les barrages de notre STEP seront aussi alimentés naturellement par le cycle de l'eau. Pour approfondir l'étude il faudrait étudier la quantité d'apport d'eau et de pertes tout au long de l'année. Cela pourrait amener à pomper plus ou moins d'eau dans notre bassin supérieur.

ANALYSE ÉCONOMIQUE

L'estimation des coûts (en Euros) est basée sur les rapports de l'Irena [19] ainsi que la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE) [20]. Grâce à ces estimations, le coût actualisé de l'énergie (LCOE) a pu être calculé dans chaque domaine (voir tableau 3).

	Photovoltaïque	Eolien	STEP
CAPEX	970 millions €	280 millions €	1,2 milliard €
OPEX	20 millions €	9 millions €	30 millions €
Production	1262 GWh	606 GWh	212 GWh
Taux d'actualisation	3%	4%	3%
Durée de vie	30 ans	30 ans	100 ans
LCOE (€/MWh)	55	42	320

Tableau 3 : Récapitulatif du coût de chaque élément

Bien que le dimensionnement du réservoir de la STEP ait été réalisé pour qu'il soit le plus petit possible, son LCOE reste important car stocker de l'énergie est un processus coûteux.

Avec ces trois LCOE, le LCOE total a pu être calculé. Il est de 87 €/MWh [Annexe 5].

En comparant le LCOE trouvé à celui de la France continentale qui est de 55€/MWh, on se rend compte que celui-ci est légèrement supérieur, ce qui était prévisible étant donné que le stockage de l'électricité représente une part importante des investissements. Cependant, le LCOE de la Corse actuelle est de 190 €/MWh, soit deux fois plus que celui du projet. Cette différence est sûrement due aux estimations de coût faites auparavant. Les chiffres relevés dans les rapports de l'Irena et de la CRE sont des moyennes et ne prennent pas en compte l'insularité de la Corse et donc que les coûts y sont plus élevés (transports, installations...).

CONCLUSION

Aujourd'hui la Corse est toujours dépendante énergétiquement de son interconnexion avec l'Italie. Dans un contexte de course à la transition énergétique, cette étude cherche à savoir si un mix renouvelable serait possible pour subvenir aux besoins électriques en Corse et rendre ainsi l'île autonome en énergie électrique grâce aux ENR complétées par du stockage.

Pour cela, le mix énergétique et les caractéristiques principales de ses installations ont été déterminées en tenant pour acquis la production d'hydroélectricité déjà implantée sur l'île. Une étude préliminaire de l'état actuel de la Corse a permis d'en déterminer les besoins en électricité et le pic de puissance appelée dans l'année. L'étude des potentiels PV et éolien a montré qu'il était théoriquement possible d'y répondre en complétant la production hydraulique déjà installée. En choisissant des panneaux PV à 400Wc de 2m² ainsi que des éoliennes de 3,6MW de 90m de haut, il a été possible de déterminer un mix énergétique en tenant compte de leurs avantages et inconvénients. La répartition suivante a été retenue : 55% de PV, 26% d'éolien et 19% d'hydraulique. L'analyse de la production et de la consommation mensuelle de l'île avec ce mix énergétique permet d'obtenir la capacité de stockage nécessaire de la STEP soit 217 GWh. Cette valeur a permis de dimensionner l'installation d'une STEP avec une hauteur de chute de 950m et d'un volume de 104 millions de m³ d'eau. Finalement, une analyse du LCOE de toutes ces nouvelles installations, estimé à hauteur de 87€/MWh, donne une idée de la faisabilité du projet.

L'hypothèse de restreindre l'étude uniquement aux solutions de PV et éolien a permis de s'appuyer sur des technologies matures et fiables mais aussi de simplifier l'analyse. Pour compléter le mix, la géothermie et la biomasse auraient pu être envisagées comme sources supplémentaires d'énergie. La biomasse aurait en plus l'avantage d'être pilotable et de réduire le coût du stockage, elle est notamment mentionnée dans la dernière PPE de l'île [4]. Une dernière nuance à apporter serait de dire que cette étude s'est focalisée sur les moyens de production d'électricité mais une étude complémentaire pourrait être effectuée avec l'évolution de la consommation électrique en Corse. Celle-ci tiendrait compte de l'influence croissante de l'efficacité énergétique, de la sobriété des modes de vie, ou à l'inverse, de l'électrification des transports.

REMERCIEMENTS

Nous souhaitons ici remercier les professeurs Daniel Rousse et Patrick Turcotte qui nous ont soutenu et aidé dans les différentes démarches.

Nous souhaitons aussi remercier les représentants du site *meteoblue.com* qui nous ont offert l'accès aux données météo de la Corse sur plus de 30ans. Merci à eux.

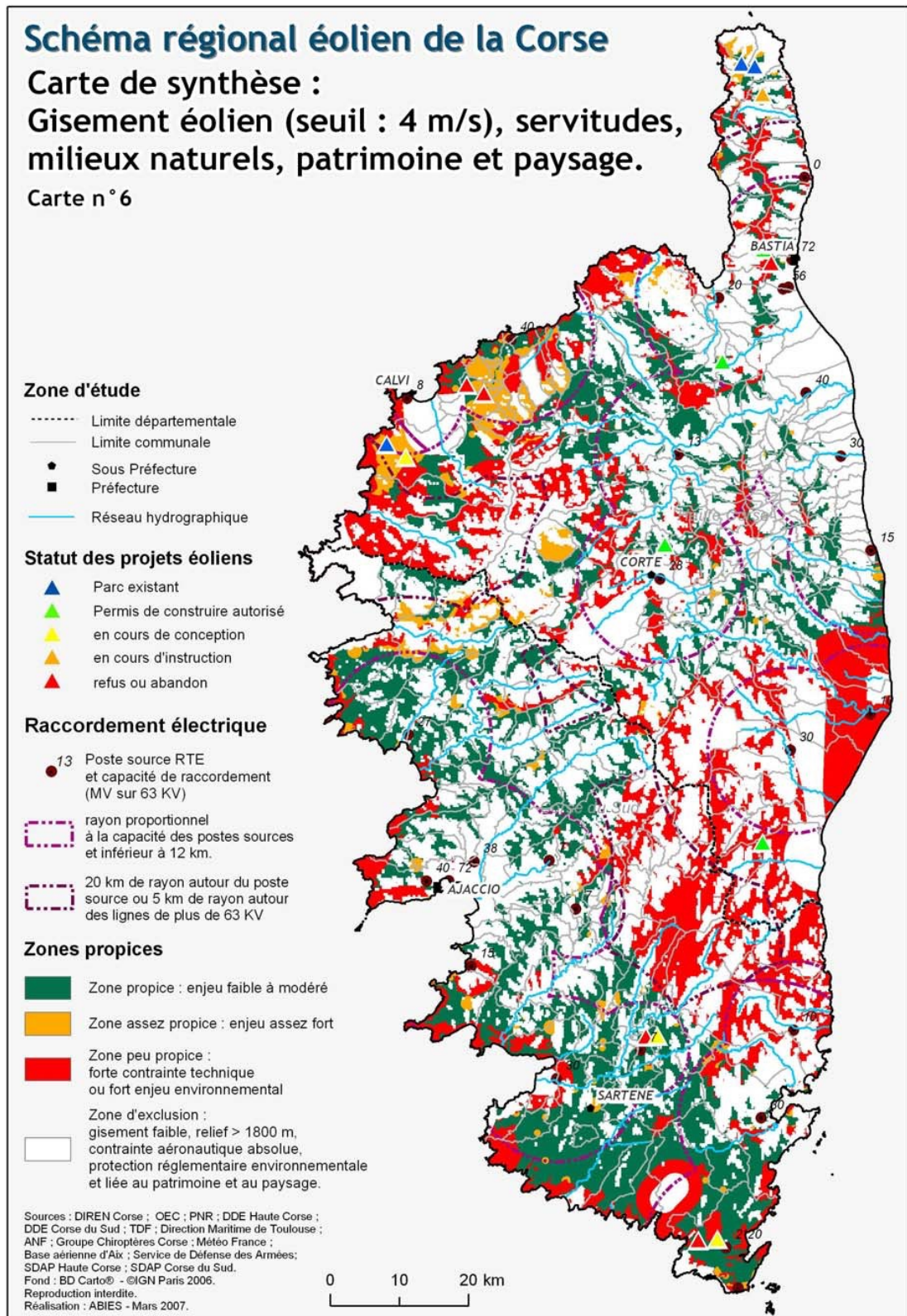
RÉFÉRENCES

- [1] AUE avec les données de l'OREGES. 2018. *Énergie - Air - Climat*. Edition 2018. Ajaccio (Corse), 16 p. <https://www.isula.corsica/cesec/attachment/1249854/?fbclid=IwAR1p-HQak-EN8bn2KOrNISO5KApUULSn_IInSwy8LI19CoBRxISXfci1-QA> Consulté le 26 février 2021.
- [2] Article de Pierre-Louis VIOLLET. 2014. « Stockage d'énergie par pompage hydraulique : STEP ». *Les techniques de l'ingénieur*. En ligne. <<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/stockage-de-l-energie-42638210/stockage-d-energie-par-pompage-hydraulique-step-be8582/>> Consulté le 22 mars 2021.
- [3] République Française. À jour au 20 décembre 2015. *Décret no 2015-1697 du 18 décembre 2015 relatif à la programmation pluriannuelle de l'énergie de Corse*. Disponible en ligne. France : Journal officiel de la république Française. <http://www.corse.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/joe_20151220_0295_0008-1.pdf> Consulté le 1 mars 2021.
- [4] Collectivité territoriale de Corse et République Française. 2015. *Programmation pluriannuelle de l'énergie pour la Corse 2016-2018 / 2019-2023*. France, 69 p. <http://www.corse.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/PPE_Corse-Septembre2015.pdf?fbclid=IwAR13wwr9PARZ6xahj6EFETEAG5Ilg3ydin2j7zOW9mjljVZefSUyTVwSmiQI> Consulté le 1 mars 2021.
- [5] Conseil exécutif de Corse assemblée du 20 décembre 2013. 2013. *Rapport du président du conseil exécutif de Corse : Adoption du Schéma Régional Climat Air Énergie (SRCAE)*. Corse. 21 p. <<https://www.aue.corsica/attachment/490912/>> Consulté le 29 mars 2021.
- [6] EDF. « NOS VISUALISATIONS SUR LE SYSTÈME ÉLECTRIQUE ET LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ : production d'électricité par filière ». In *portail d'Opendata de EDF en Corse*. En ligne. <<https://opendata-corse.edf.fr/pages/home0/>>. Consulté le 21 février 2021.
- [7] Compte-rendu au Sénat, Novembre 2011, disponible en ligne ; <<http://www.senat.fr/compte-rendu-commissions/20111121/office.html>> Consulté le 24 février
- [8] Assemblée de Corse, 2009, Rapport du président du conseil exécutif de Corse, délibération n°09/116, disponible en ligne. <http://www.corse.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/charte_developpement_photovoltaique.pdf> Consulté le 10 février
- [9] CNRS et Università di Corsica, 2011, Cartes environnements, disponible en ligne. <https://applisweb.universita.corsica/recherche/locus/metadonnees.php?id=14_127&profil=&id_site=37&acc=ok&id_art=1113&id_rub=0> Consulté le 10 février
- [10] Annuaire Mairie, 2012, Occupation des sols du Département de la Haute-Corse, tableau haute Corse, disponible en ligne <<https://www.annuaire-mairie.fr/occupation-des-sols-departement-haute-corse.html>> Consulté le 14 février
- [11] Annuaire Mairie, 2012, Occupation des sols du Département de la Corse-du-Sud, tableau de la Corse du Sud, disponible en ligne <<https://www.annuaire-mairie.fr/occupation-des-sols-departement-corse-du-sud.html>> Consulté le 14 février
- [12] Éolien Terrestre, DREAL Corse, Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement, Disponible en ligne. <<http://www.corse.developpement-durable.gouv.fr/eolien-terrestre-r119.html>> Consulté le 12 février 2021
- [13] Schéma Régional Climat Air Énergie de Corse, Rapport p.38, Disponible en ligne. <<http://eduterre.ens-lyon.fr/thematiques/energie/energie-eolienne/sre-corse>> Consulté le 18 février 2021
- [14] Parc éolien, Espiers France, Disponible en ligne. <https://www.thewindpower.net/windfarm_fr_25096_espier.php> Consulté le 22 février 2021
- [15] Nordex N117/3600 Delta, Disponible en ligne. <<https://fr.wind-turbine-models.com/turbines/1472-nordex-n117-3600-delta#datasheet>> Consulté le 5 mars 2021
- [16] Wind power integration in Southern Brazil: Steady-state analysis, Disponible en ligne <https://www.researchgate.net/figure/Minimum-distance-between-wind-turbines-3_fig1_261302567> Consulté le 10 mars 2021
- [17] Données météo Bonifacio, Météo Blue <https://www.meteoblue.com/fr/meteo/semaine/bonifacio_france_3031801> Consulté le 15 mars 2021
- [18] Michel SABOURIN, 2020, Ingénierie hydraulique d'une turbine ; Consulté le 10 mars.
- [19] IRENA, 2020, Renewable Power Generation Costs in 2019
- [20] Commission de Régulation de l'Énergie, 2019, Rapport Coûts et rentabilités du grand photovoltaïque en métropole continentale.



ANNEXE 1

Carte dessinée par le schéma régional de la Corse pour les emplacements disponibles des éoliennes en Corse



ANNEXE 2

Fiche technique de l'éolienne Nordex N117/3600 et sa courbe de puissance.

Nordex N117/3600 Delta

Start / Turbines / Nordex / N1173600 Delta

3,6 MW



- ✓ Données de puissance
- ✓ 9 Photos
- ✗ Modèles

Photos



Fiche technique

Électricité

Puissance nominale:	3.600.0 kW
Flexibler Leistungsmodus:	-
Vitesse de démarrage:	3.0 m/s
Vitesse nominale du vent:	-
Vitesse de déconnexion:	25.0 m/s
Vitesse de survie:	-
Wind zone (DIB):	III
Wind class (IEC):	Ila

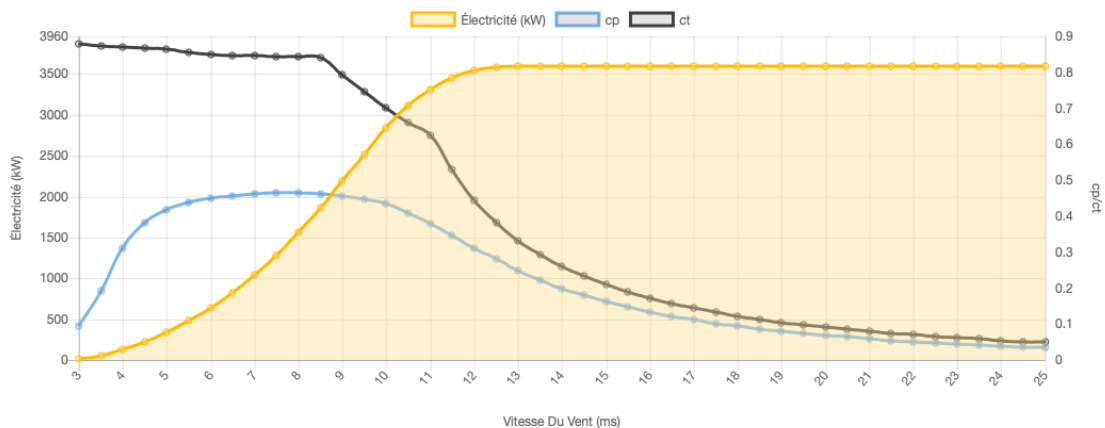
Rotor

Diamètre:	116.8 m
Surface du rotor:	10.715.0 m ²
Nombre de feuilles:	3
Vitesse, max:	14.1 U/min
Vitesse de l'extrémité:	86 m/s
Désignation du type:	NR55.5
Concret:	GFRP
Fabricant:	Nordex
Densité de puissance 1:	336.0 W/m ²
Densité de puissance 2:	3.0 m ² /kW

Buy spares
SPARES IN MOTION
Buy blades for Nordex N117/3600 Delta

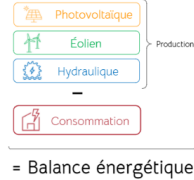
Au fabricant de l'éolienne

Courbe de puissance



ANNEXE 3

Annexe Mix énergétique



Définition balance énergétique :

Somme de l'énergie produite par les différents moyens de production moins la consommation.

	Part dans le mix	Énergie produite annuellement (GWh)
Photovoltaïque	55%	1262
Eolien	26%	606
Hydroélectricité (hors STEP)	19%	426
Total	100%	2295

Une fois que la répartition du mix est fixée (ici on parle en pourcentage d'énergie produite annuellement) il est facile de trouver la quantité d'énergie produite par chacune des sources.

Pour le PV : $0,55 \times 2295 = 1262$ GWh

Le tableau suivant a été déterminé avec l'aide de PVWatt pour la partie PV, ainsi que des données de vent et de caractéristiques de l'éoliennes pour la partie éolienne.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Total	
énergie produite par un panneau 0,4 kWc (2m ²), en kWh	18	23	36	44	50	50	54	50	42	30	18	15	430	kWh
énergie produite par une éolienne	1311	1232	1394	974	1009	822	694	644	831	995	1046	1090	12042	MWh

L'énergie produite totale dans la dernière colonne permet de trouver le nombre de panneaux PV et d'éoliennes.

$1262 \text{ GWh} / 430 \text{ kWh} = 2\,935\,583$ panneaux PV

$606 \text{ GWh} / 12\,042 \text{ MWh} = 50$ éoliennes

Les surfaces foncières associées sont alors respectivement :

$(2\,935\,583 \times 2 \times 1 / 0,33) / 10000 = 1779$ Ha ; 2 car les panneaux font 2m², 0,33 car c'est le ratio surfaces panneaux PV/surface foncière pour une centrale au sol

$50 \times 64 = 3\,222$ Ha

Ces surfaces sont d'ailleurs bien en dessous des surfaces maximales disponibles déterminées dans les parties potentiels.

Le tableau suivant est déterminé à partir du nombre de panneaux PV et d'éoliennes ainsi du tableau précédent.

(GWh)	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Total						
énergie solaire	53	68	106	129	147	147	159	147	123	88	53	44	1262						
énergie éolienne	66	62	70	49	51	41	35	32	42	50	53	55	606						
énergie hydraulique	52	74	58	41	43	13	9	10	7	5	46	68	426						
consommation Corse	250	217	206	172	162	161	198	205	159	149	187	230	2295						
Balance énergétique	-	80	-	13	28	48	79	40	5	-	16	13	-	5	-	35	-	63	-

Les pertes de la STEP sont estimées à 67 GWh. Il faut donc ajouter un certain nombre d'éoliennes et de panneaux PV. Attention ici ce n'est pas possible d'augmenter la production d'hydroélectricité.

$(55 / (55 + 21)) \times 67 = 45,5$ GWh soit 106 000 panneaux PV donc 64 Ha.

$(21 / (55 + 21)) \times 67 = 21,5$ GWh soit 2 éoliennes donc 128 Ha.

ANNEXE 4

Annexe : Installation de la station de transfert d'énergie par pompage

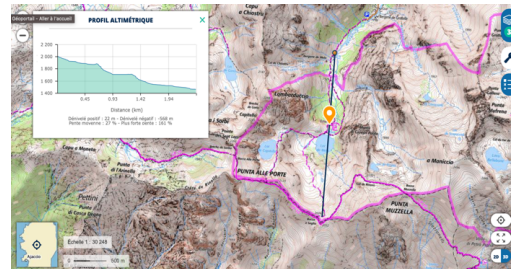
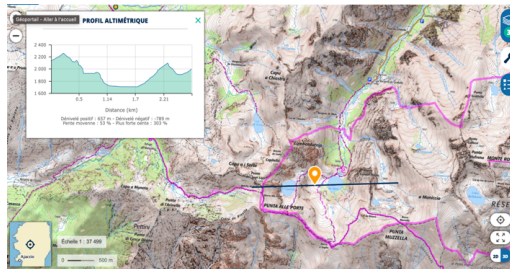
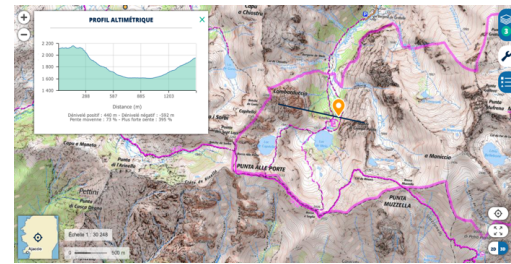
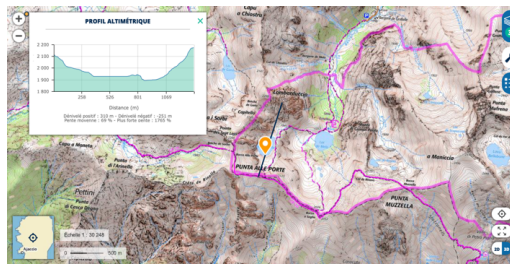
Visualisation du bassin supérieur de notre STEP :



Démonstration du calcul du volume des bassin :

Afin de calculer le volume des bassins, les profils altimétriques de l'outil GéoPortail sont utilisés :

Pour le bassin supérieur :

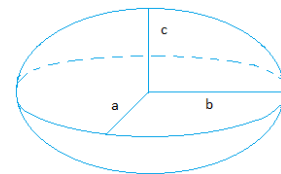


Le volume du bassin a donc été approximé à une ellipsoïde :

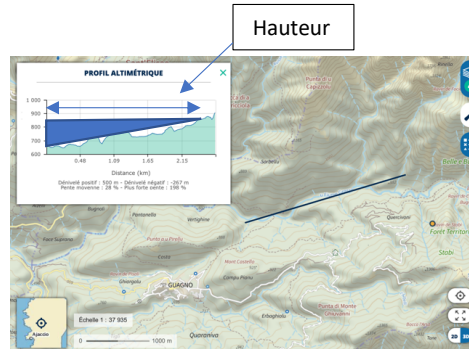
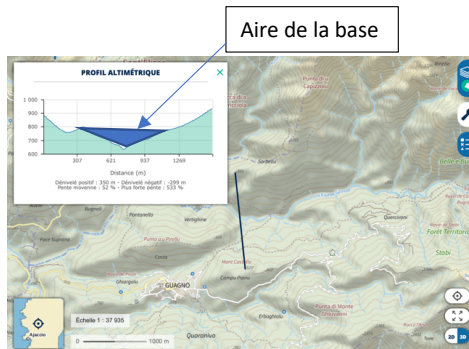
$$V_{bassin} = \frac{4}{3} * \pi * a * b * c * \frac{1}{2}$$

Avec : a = 600 ; b = 400 ; c = 200

Donc : $V_{bassinSup} = 104$ millions de m³ d'eau



Pour le bassin inférieur :

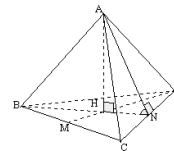


$$V = \text{Aire Base} * \text{hauteur} / 2$$

$$\text{Aire Base} = 150 * 700 / 2 = 52\,500 \text{ m}^2$$

$$V = 52\,500 * 2200 = 116 \text{ Millions de m}^3$$

Donc : $V_{\text{bassinInf}} = 116 \text{ millions de m}^3 \text{ d'eau}$



ANNEXE 5

Analyse économique

Les données nécessaires pour le calcul du LCOE PV proviennent du rapport de la Commission de Régulation de l'énergie. Tandis que celles pour le LCOE de l'éolien ainsi que celui de la STEP sont extraites du rapport de l'IRENA 2019.

Pour le calcul du CAPEX la STEP est identifiée à deux barrages de 150 MW (il y a deux barrages car deux réservoirs dans la STEP ainsi qu'une puissance installée de 300 MW). Le résultat trouvé est cohérent avec celui provenant du rapport « Coût d'un système électrique optimal sans émissions de CO2 pour la France avec et sans nucléaire » publié en Janvier 2020.

Afin de calculer le LCOE totale, il faut prendre en compte les parts des différentes technologies dans le mix ainsi que le fait que toute l'énergie produite n'est pas stockée dans la STEP :

$$LCOE_{TOTAL} = \frac{\%PV}{\%PV + \%EOLIEN} LCOE_{PV} + \frac{\%EOLIEN}{\%PV + \%EOLIEN} LCOE_{EOLIEN} + \frac{Production Stockée}{Production PV et Eolien} LCOE_{STEP}$$

Paramètre :

%PV= 55

%EOLIEN= 26

Production Stockée = 212 GWh

Production PV et EOLIEN= 1868 GWh

