

LES MOULINS

**Quel potentiel
hydroélectrique ?**



**VALORISONS
NOS MOULINS**

« L'eau fait partie du patrimoine commun de la nation. Sa protection, sa mise en valeur et le développement de la ressource utilisable, dans le respect des équilibres naturels, sont d'intérêt général. »

Article L210-1
du Code de l'Environnement



Résumé de l'étude



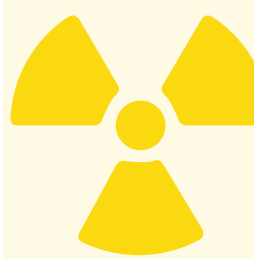
103 867 ROE	16 000 Détruits	+ de 70% des ROE sont des moulins historiques
87 867 ROE existants	60% avec informations	



+ 2,8 TWh/an électricité verte, plus bas eqCO2/TWh	COUVRE 50% des besoins en éclairage publique
---	---




82 000 moulins en 1809 (statistiques impériales)	Aujourd'hui, AU MOINS 36 000 MOULINS ÉQUIPABLES	d'une turbine, dans le respect de la réglementation environnementale
---	---	---



PUISSANCE CUMULÉE ≈ 1 RÉACTEUR NUCLÉAIRE	Puissance de 22 kw/unité , à pleine puissance 40% du temps
--	---

Données d'entrée fournies par organisme d'Etat
Automatisation du traitement et expertise terrain
Extrapolation par gabarit et résultats géoréférencés



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

ATOUS DE LA FILIÈRE

- mise en route rapide** **acceptabilité locale** **retombées économiques locales** **emplois**
- coût de production bas** **préservation de patrimoine** **distribution circuit court**
- souveraineté énergétique** **production en adéquation** **services apportés au réseau avec la consommation**

Sommaire interactif

- Résumé de l'étude 1
- Contexte.....3
- Quelques chiffres.....5
- État des lieux7
- Quel potentiel Hydroélectrique ?.....9
- Analyse macro à l'échelle de la France métropolitaine 15
- Analyse affinée 23
- Retour dans le passé 33
- Extrapolation des résultats de la Manche à l'échelle de la France35
- Conclusion résumée37
- Sources..... 38

Contexte

Des moulins au service de la nation

POUR LA TRANSITION



Au moment de la réalisation de cette étude, l'invasion russe de l'Ukraine pousse les gouvernements européens à se tourner de toute urgence vers le charbon et le gaz naturel liquéfié, deux combustibles fossiles émetteurs de CO₂, pour sécuriser l'approvisionnement énergétique de l'hiver prochain.

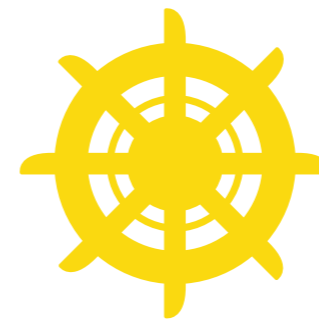
Les énergies fossiles ne sont pas inépuisables et, étant émettrices de CO₂, elles contribuent au réchauffement climatique. Face à ce constat, la plupart des pays du monde ont engagé une « transition énergétique ».

Ce type de « transition » n'est pas un phénomène sans précédent (force de l'eau, charbon, pétrole, nucléaire civil).

Mais cette crise internationale entraîne un alignement des enjeux de souveraineté énergétique et de transition verte, favorisant les économies d'énergie ainsi que le déploiement à vitesse grand V des énergies renouvelables et locales.

C'est dans ce contexte que l'énergie hydraulique des moulins* de nos territoires mérite d'être exploitée pour produire de l'électricité au plus près des consommateurs et ce dans le respect des enjeux de biodiversité et de protection de l'Environnement.

Dans l'intérêt à moyen et long terme de la France, dans une dynamique de production d'énergie bas carbone et pour préserver le climat, la Fédération Française des Associations de sauvegarde des Moulins (FFAM) a déterminé le potentiel des moulins à eau à l'échelle nationale.



Qu'est-ce qu'un moulin ?

*Un moulin est une machine à moudre, à l'origine avec une ou plusieurs meules, principalement les grains de céréales récoltées afin de les transformer en poudre plus ou moins grossière ou farine. Le mot désigne aussi, par extension ou par analogie, toute machine ou phénomène fondée sur le principe initial de transformation de l'énergie hydraulique (cours d'eau, marée), animale ou éolienne (vent) en mouvement de rotation, mouvement pouvant être source d'énergie mécanique pour la mise en mouvement de machinerie tournante ou d'énergie électrique.

Le travail que représente cette initiative est colossal et s'installe dans la durée (objectif d'un projet avec doctorant) le présent document en fait une synthèse préliminaire qui comprend notamment :

- L'analyse des études antérieures et objectifs de développement
- La compatibilité des projets d'équipement avec les exigences environnementales
- les principaux points méthodologiques,
- les résultats de l'étude préliminaire.

Pour la Transition énergétique, on peut compter sur le potentiel hydroélectrique des moulins.

La transition énergétique exige la mobilisation de l'ensemble des ressources renouvelables dans le mix énergétique. La promotion de l'hydraulique est donc logique et en phase avec la protection des milieux aquatiques et la reconquête du bon état écologique des rivières. Enfin, l'hydraulique n'est pas seulement affaire d'énergie et d'environnement, c'est aussi un patrimoine historique et culturel valorisable pour le territoire.

« Aucune rivière de France, si modeste soit-elle, n'est dénuée d'un potentiel énergétique digne d'être exploité à l'heure de la transition énergétique. »

Quelques chiffres

Première source d'énergie renouvelable

Le travail réalisé fait l'analyse du potentiel hydroélectrique des moulins à eau existants en France hors moulins à marée. On notera qu'il existe un gisement plus conséquent en intégrant l'ensemble des seuils existants ayant un autre usage (navigation, barrages-réservoirs, AEP^A; STEP^B), le potentiel hydrolien^C, les optimisations de centrales et le développement de nouveaux sites.

Préalablement à l'évaluation du potentiel hydroélectrique des moulins, une analyse des études antérieures, (thèses, rapports, présentations...) a été menée. Malheureusement, les résultats sont difficiles à comparer car les études ont été réalisées à des dates différentes, sur la base de méthodes, de réglementations non homogènes, non spécifiques aux moulins et à des échelles géographiques variables.

A titre d'exemple, les estimations du productible vont de **1 TWh/an** d'après le rapport de l'ingénieur Fabrice DAMBRINE en 2006 (avant la parution de la LEMA^D) -qui se basait de façon arbitraire sur l'équipement de 30 000 moulins de plus de 10 kW- à un potentiel de 3,3 TWh selon le travail de recensement de Punys et al en 2019 (mission européenne RESTOR HYDRO¹). Par ailleurs, les résultats publiés en 2013 issus de l'étude de convergence² entre la DGEC^E, la DEB^F, les DREAL^G et les producteurs fédérés autour de UFE^H estiment un potentiel pour l'équipement de seuils existants et non spécifiquement aux moulins allant de 0,9 TWh/an à 1,7 TWh/an (hors convergence).

On notera que ces résultats excluent les sites de moins de 100 kW, majoritairement les chutes inférieures à 2 m et que certaines régions sont considérées avec un potentiel marginal (inférieur à 1,8 MW-8,2 GWh), ou non connu (exemple de la Normandie).

Objectifs quantitatifs et orientations fixés à la filière par la PPE 2019/2028

- Augmenter la capacité de production hydroélectrique de +0,9 à +1,2 GW d'ici 2028 : la filière avait identifié dans les travaux de préparation de la PPE +1,7 GW de potentiel à horizon 2030.
- Un appel d'offres de 35 MW/an reconduit jusqu'en 2024

A) AEP : Alimentation en Eau Potable

B) STEP : STation d'ÉPuration des eaux usées

C) hydrolienne turbine hydraulique (sous-marine ou à flot) qui utilise l'énergie cinétique des courants marins ou fluviaux.

D) LEMA : Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques

PROJET JANVIER 2020

PROGRAMMATION PLURIANNUELLE DE L'ÉNERGIE

2019-2023 2024-2028

Offre d'énergie/développement des énergies renouvelables

Potentiel		Total	Dont hors liste 1	
Nouvelles Centrales	Concessions (sites vierges)	>10MW	Env. 370 MW	
		<10MW	Env. 120 MW	
	Autorisations	Sites vierges	Env. 750 MW	Env. 170 MW
		Sites existants (barrages non équipés) hors moulins	Entre 260 et 470 MW	
	Sites existants (barrages non équipés) moulins	Env. 350 MW		
Suréquipement et modernisation de centrales concédées existantes à horizon 2028			Env. 400 MW	

Tableau 23 Potentiel de capacité hydroélectrique (MW)

Cette dernière étude a contribué à la définition des objectifs du programme pluriannuel de l'énergie (PPE) de métropole sur la période 2019-2028 adopté le 21 mars 2020. Elle fixe notamment des objectifs quantitatifs et des orientations relatives à l'énergie hydroélectrique

Une nouvelle étude du potentiel hydroélectrique devra être menée pour mettre à jour les données de 2013, conformément aux dispositions de l'article 89 I A de la Loi climat et résilience du 22 août 2021, pour établir la PPE 3 (2024 -2033). C'est dans cette optique que la présente étude détermine le potentiel hydroélectrique des moulins sur la base d'une nouvelle méthode d'évaluation.

E) DGEC : Direction générale de l'Énergie et du Climat

F) DEB : Direction Eau Biodiversité

G) DREAL : Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

H) UFE : Union Française de l'Électricité

L'ÉTAT A BESOIN D'UNE BASE DE DONNÉES HOMOGENE, À CE JOUR LE POTENTIEL DE PRODUCTION HYDROÉLECTRIQUE DES OUVRAGES EXISTANTS REPRÉSENTERAIT ENTRE 1 ET 3,3 TWH/AN.⁴

Un outil de production

qui limite le réchauffement climatique

Avec 4 g eqCO₂ par kWh produit⁵, l'énergie hydraulique représente le meilleur bilan de toutes les énergies productrices d'électricité (GIEC IPCC, SRREN Report 2012⁶). Ce chiffre est encore meilleur dans le cas des moulins, car le génie civil (seuils, biefs, chambre d'eau) est déjà présent.

L'équipement des moulins paraît donc vital dans la stratégie de lutte contre les émissions de gaz à effet de serre et prévention du réchauffement climatique. D'autant que ce réchauffement représente la menace de premier ordre sur l'évolution à long terme des milieux aquatiques continentaux⁷.



Influence sur le milieu

Les barrages de moulins, que l'on appelle seuils ou chaussées, ont généralement une hauteur de moins de 2 m. Ils modifient localement la morphologie de la rivière, et leur impact sur la qualité de l'eau est positif par l'effet de « dénitrification » unanimement décrit par les études scientifiques françaises et internationales (étude CNRS Piren Seine cascade de l'Azote 2011, Pinay et al CNRS IFREMER IRSTEA 2017, Maeva et al. 2020, Powers et al. 2015 et bien d'autres).

Les chaussées des moulins ont globalement les mêmes effets sur les eaux que les barrages de castors qui les ont précédés historiquement pendant 5 millions d'années jusqu'à la disparition de cette espèce vers l'an mille en France (cf article wikipedia barrage de castors).

Ces petits barrages humains ou de castors donnent traditionnellement à nos cours d'eau un aspect étagé, augmentent les masses d'eau, ralentissent les écoulements, diversifient les faciès et sont admirablement adaptés à la saisonnalité marquée des climats de l'hémisphère nord ou à un excès de pluie hivernale succède une pénurie estivale.

Dans ce cadre ils permettent à la fois de laminer l'énergie des eaux lors des crues, de ralentir la montée des eaux mais surtout de préserver des masses d'eau importantes dans les rivières à l'occasion des saisons sèches indispensables à la survie des milieux aquatiques et qui servent traditionnellement de zones refuges aux poissons.

2 études ont comparé les effets des barrages de castors et des petits barrages humains à l'image de ceux des moulins et concluent à des effets comparables sur les milieux et les eaux (études Hart et al. 2002, Ecke et al. 2017).

QUALITÉ EAU DES ROE HYDROÉLECTRIQUES

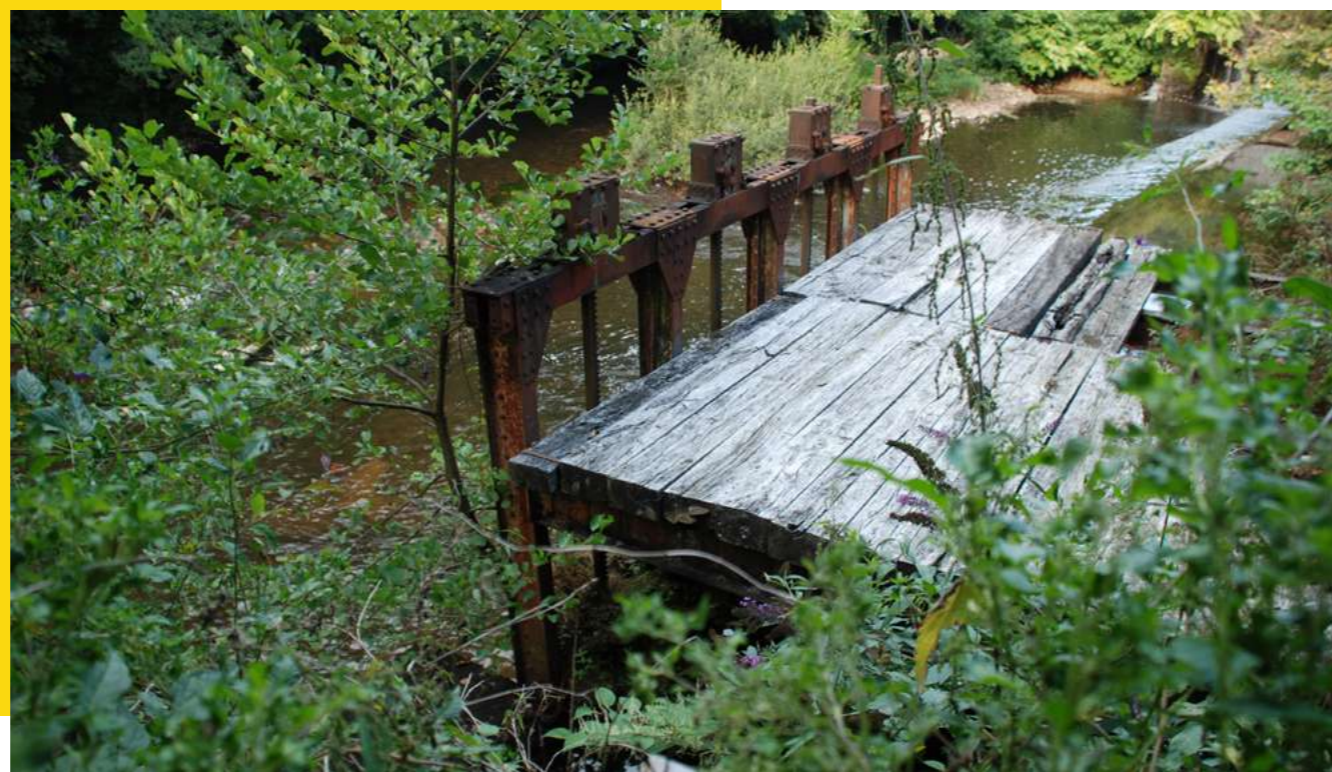
- | | |
|------------|-----------------|
| ● Très bon | ● Médiocre |
| ● Bon | ● Mauvais |
| ● Moyen | ● Non renseigné |

Les nombreuses études scientifiques ayant étudié les effets des barrages de castors concluent à des effets positifs à très positifs sur l'ensemble des enjeux liés à l'eau : ressource, qualité, milieux, crue (cf wikipedia article barrage de castor). De même un certain nombre d'études scientifiques sur l'effet de la succession des chaussées de moulins concluent la même chose en particulier l'alimentation des nappes alluviales ou l'amélioration de la qualité de l'eau.

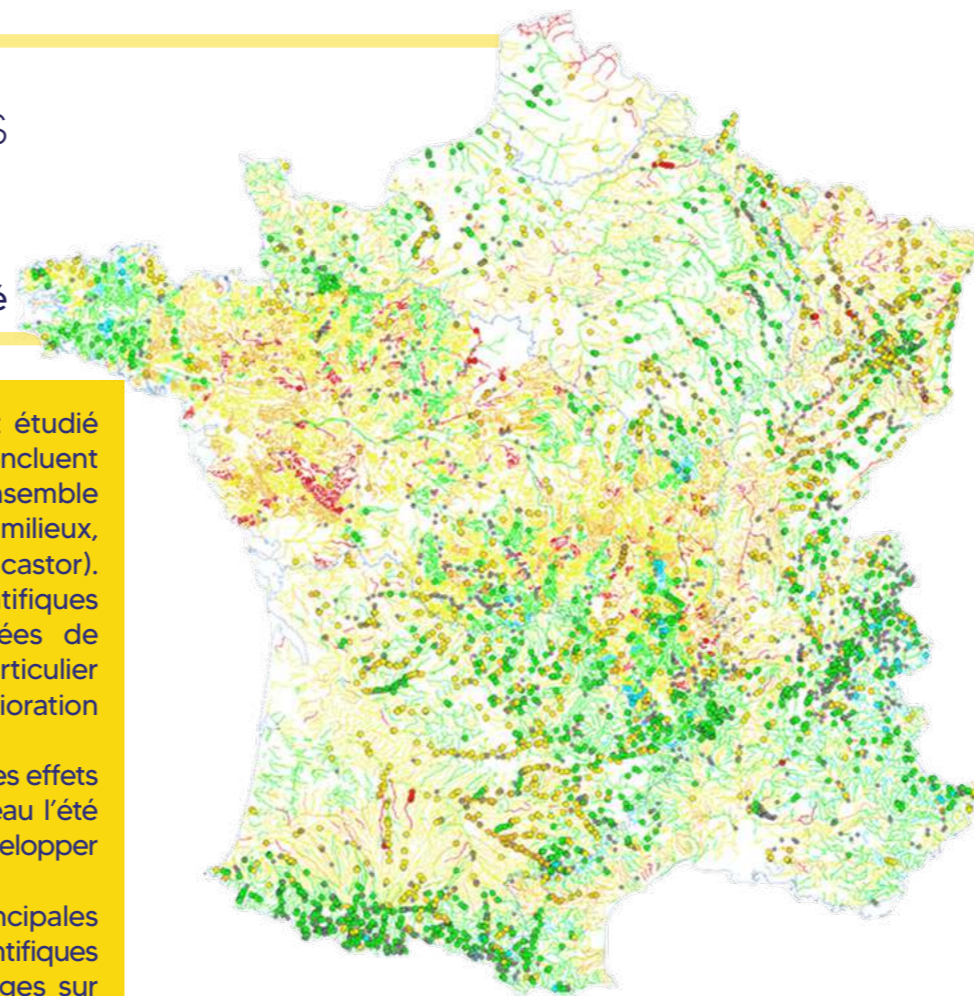
S'agissant des salmonidés ils ont également des effets positifs puisqu'ils préservent des espaces d'eau l'éte ou les pontes de salmonidés peuvent se développer (cf article wikipedia barrages de castors).

Sur ce sujet la FFAM a synthétisé les principales données anciennes et récentes et études scientifiques sur l'effet de la succession de petits barrages sur nos eaux dans un document annexé à la présente présentation.

En matière d'écologie, la loi prévoit que leur exploitation garantisse en permanence de l'eau dans nos rivières (débit réservé laissé dans le cours d'eau et « non dérivé » dans les biefs) et n'entravent pas la circulation des poissons migrateurs (article L214-18 et L214-17 du Code de l'Environnement).



CARTE SUR LA QUALITÉ DES MASSES D'EAU DES CENTRALES HYDROÉLECTRIQUES



Qualité des masses d'eau des sites

hydroélectriques, la preuve par l'exemple

Une analyse sur la qualité des masses d'eau réalisée par France hydroélectricité met en évidence que l'état écologique est considéré de moyen à très bon là où il existe une succession de centrales hydroélectriques. Donc, les ouvrages successifs n'ont peu ou pas d'impact sur la qualité des masses d'eau.

Le classement en liste 1 des cours d'eau constitue une garantie de la non dégradation physique de ces derniers par la création de nouveaux obstacles à l'écoulement.

Le classement en liste 2 des cours d'eau induit une obligation de mise en conformité des ouvrages transversaux pour assurer la circulation des poissons migrateurs et le transport suffisant des sédiments.

Etudes antérieures Quésaco ?

Nous avons pu constater dans les études antérieures que le gisement a été très majoritairement évalué sur la base d'une analyse topographique (dénivelé du lit) et hydrologique (débit inter-annuel (module) parfois soustrait du débit réservé), permettant de déterminer une puissance (MW) potentielle par tronçon de cours d'eau, déduction faite des puissances déjà installées. A cette puissance est multiplié un nombre d'heures à puissance nominale moyenne pour en déduire le productible (TWh).

Ce travail particulièrement fastidieux permet de déterminer un gisement de puissance brute variant selon des hypothèses d'enjeux environnementaux (classement de cours d'eau, Natura 2000, parc nationaux, réserves,...) et des schémas directeurs, réglementaires considérés comme « acceptables ». Dans le cas présent, cette méthode ne tient pas compte des ouvrages ancestraux dont l'influence préexiste sur le milieu depuis des siècles et pour lequel l'impact est de fait limité donc acceptable au regard du bénéfice apporté.

Par ailleurs, plusieurs limites sont intervenues dans l'élaboration de ces travaux ; en particulier la difficulté de reconstituer les débits exploitables et les hauteurs de chutes dans les secteurs à faible pente.

LE POTENTIEL HYDROÉLECTRIQUE ?



Methodologie générale

PRINCIPE GÉNÉRAL

Le potentiel dépend de la hauteur de chute (1) et du débit (2). Pour calculer les chutes exploitables (1), il a été décidé d'utiliser la base de données «**Référentiel des Obstacles à l'Écoulement (ROE)**» qui donne l'implantation des ouvrages de moulins et pour les débits (2) la plateforme HydroPortail, application d'accès aux données hydrométriques, qui a remplacé en janvier 2022 les interfaces d'accès à la Banque HYDRO. Enfin, pour reconstituer les débits au droit des ouvrages, la base de données BD Alti a été retenue.

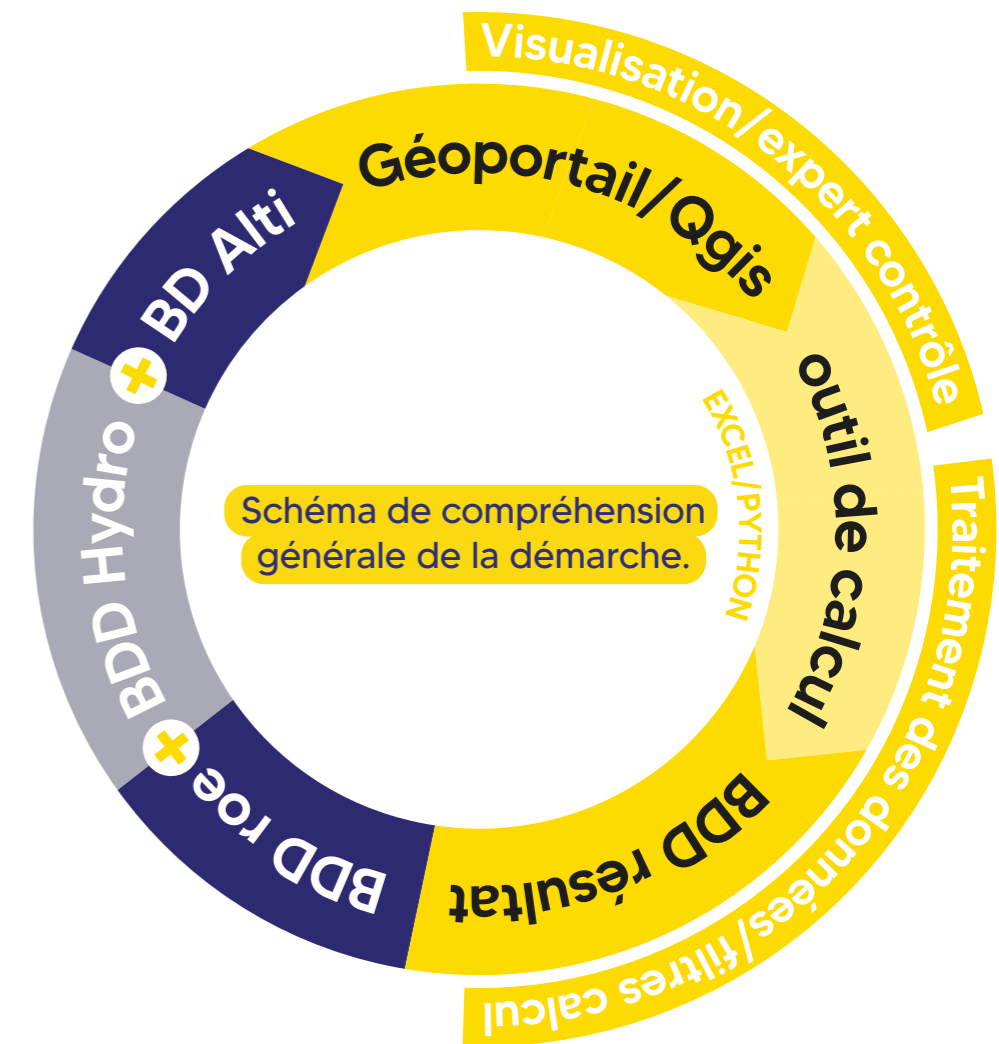
•BDD ROE Source des données :

«**ObstEcouL_MAJ 2022_** »
Ce document contient toutes les caractéristiques de ROE en France et notamment leurs noms, natures, leurs usages et hauteur de chute.

•Application en ligne «**Géoportail** »

Cette application en ligne gouvernementale permet l'affichage de grandes données de localisation des ROE sur le plan IGN et la recherche de moulins historiques sur la carte de Cassini.

L'ensemble des données utilisées sont des données d'ETAT, libre d'accès.



DONNÉES D'ENTRÉE ROE

La base de données «**Référentiel des Obstacles à l'Écoulement* (ROE)** » a été créée en 2009 par l'ex-ONEMA (une des composantes de l'actuel Office Français de la Biodiversité) et ses partenaires (Irstea / CNRS / agences de l'eau, ministère en charge de l'environnement) afin de recenser les obstacles présents sur les cours d'eau en France.

À ce jour (octobre 2020), 103 867 obstacles à l'écoulement des cours d'eau validés sont répertoriés dans la base de données gérée par l'Office Français de la Biodiversité, sur les 120 000 estimés. La hauteur de ces «**obstacles** » constitue une part de la chute potentiellement exploitable.

Par ailleurs, la chute peut être augmentée par des aménagements complémentaires (canaux et conduites d'amenée et de fuite).

ANALYSE DE LA BASE ROE⁹

Sur 103 867 obstacles à l'écoulement, en 2019, environ 16 000 ROE ont été détruits ou programmés de l'être.

Les 3 types principaux (seuils, obstacles induits par des ponts, barrages) représentent 98% des obstacles existants recensés. Pour les 3 types principalement recensés, 41% des obstacles sont sans information concernant leurs usages. Quel que soit le type d'obstacle considéré (seuil, barrage ou obstacle induit par un pont), les ouvrages induisent un dénivelé entre les lignes d'eau amont et aval, ce qui génère une chute d'eau. Ces hauteurs de chutes¹⁰ sont renseignées pour 62% des obstacles, le taux de renseignement variant de 56% à 85% en fonction de leurs usages connus.

*Obstacle à l'écoulement :

ouvrage construit dans le lit d'un cours d'eau et à l'origine d'une modification de l'écoulement des eaux de surface

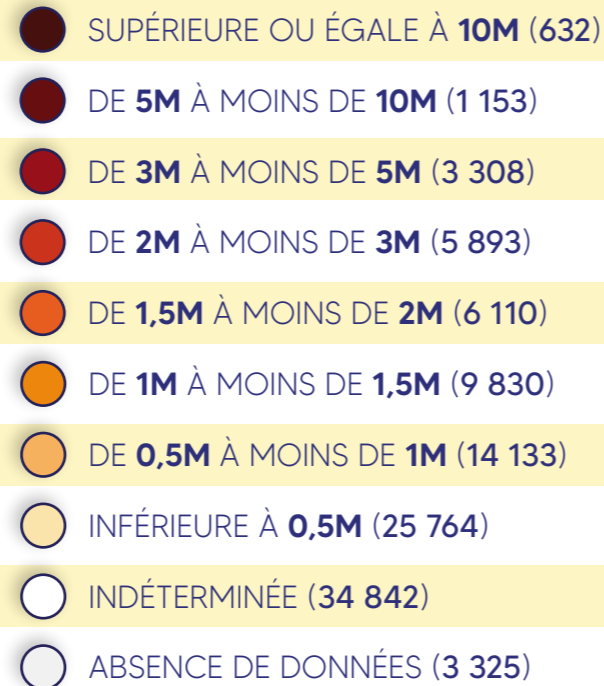
LIMITES ROE

L'inventaire des obstacles est en cours et ne sera pas finalisé avant plusieurs années (103 867 obstacles recensés à ce jour sur 120 000 estimés). Le renseignement de la base de données n'est pas réalisé d'une façon parfaitement uniforme (outil collaboratif avec interprétation et process de renseignement non homogène).

Les intitulés ne sont pas toujours réalistes, les données de hauteur ne sont pas systématiquement présentes et parfois erronées.

Par ailleurs, nous avons pu constater une répétition d'obstacles référencés pour un même ouvrage (jusqu'à 4 fois).

Hauteur (en mètre) Figure 1: hauteur des seuils dans la base ROE



DONNÉES D'ENTRÉE BANQUE HYDRO ET RÉFÉRENTIEL HYDROMÉTRIQUE

Pour déterminer le débit exploitable sur chaque ROE, la banque hydroportail (SHAPI) et le référentiel Sandre sont utilisés.

Pour cela, nous avons collecté les données des sites et stations hydrométriques. Un site hydrométrique est un lieu géographique (tronçon de cours d'eau) sur lequel les mesures de débit sont effectuées et réputées homogènes et comparables entre elles. Pour en simplifier l'exploitation cartographique, le site hydrométrique est ramené à un point.

L'USAGE ÉNERGIE ET HYDROÉLECTRICITÉ CONCERNE **4681 INSTALLATIONS.**

<https://professionnels.ofb.fr/fr/docdataviz/dataviz-mieux-connaître-ouvrages-qui-jalonnent-nos-cours-deau>

Figure 1 : correspond à usage des ROE selon AFB

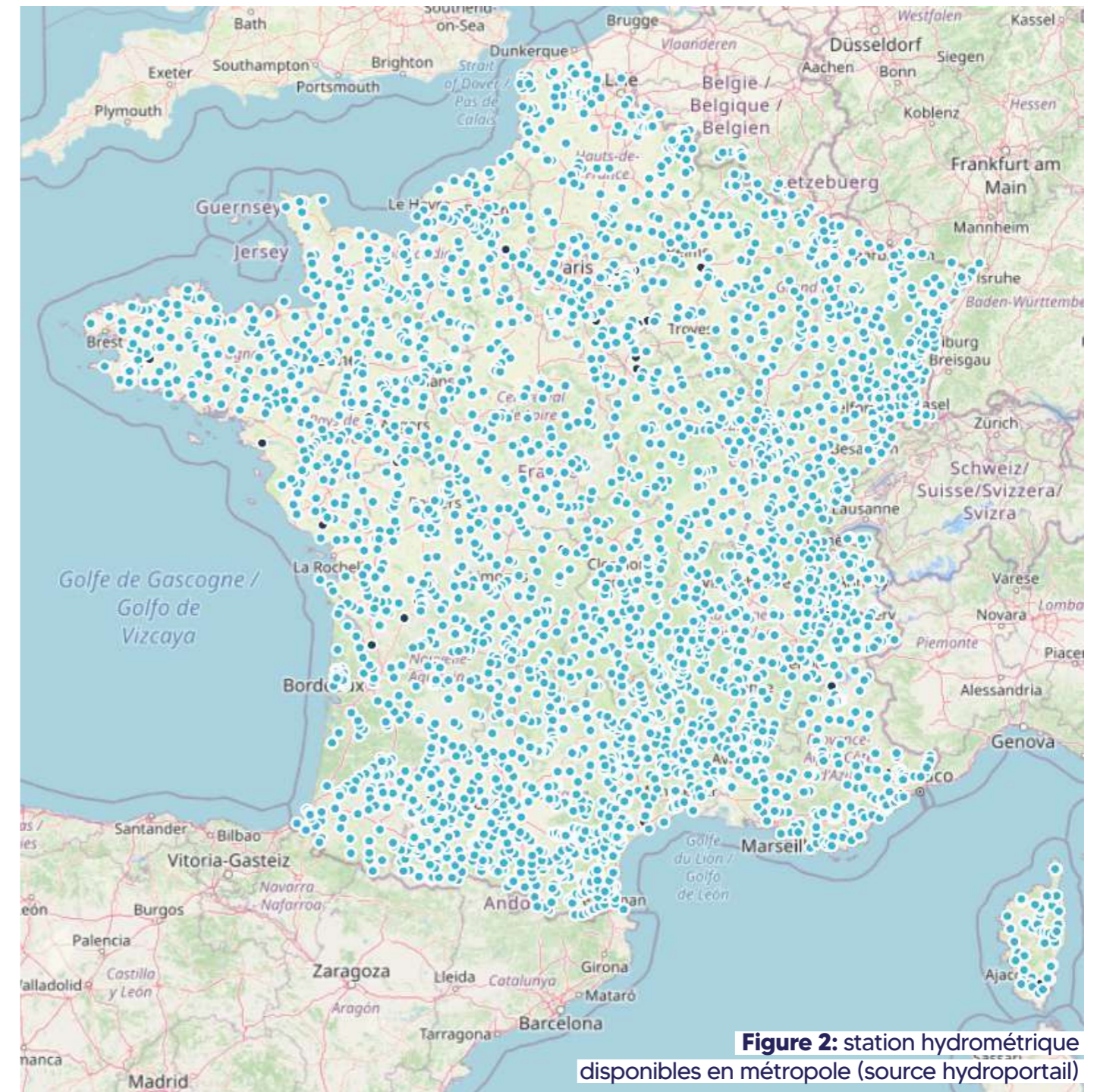
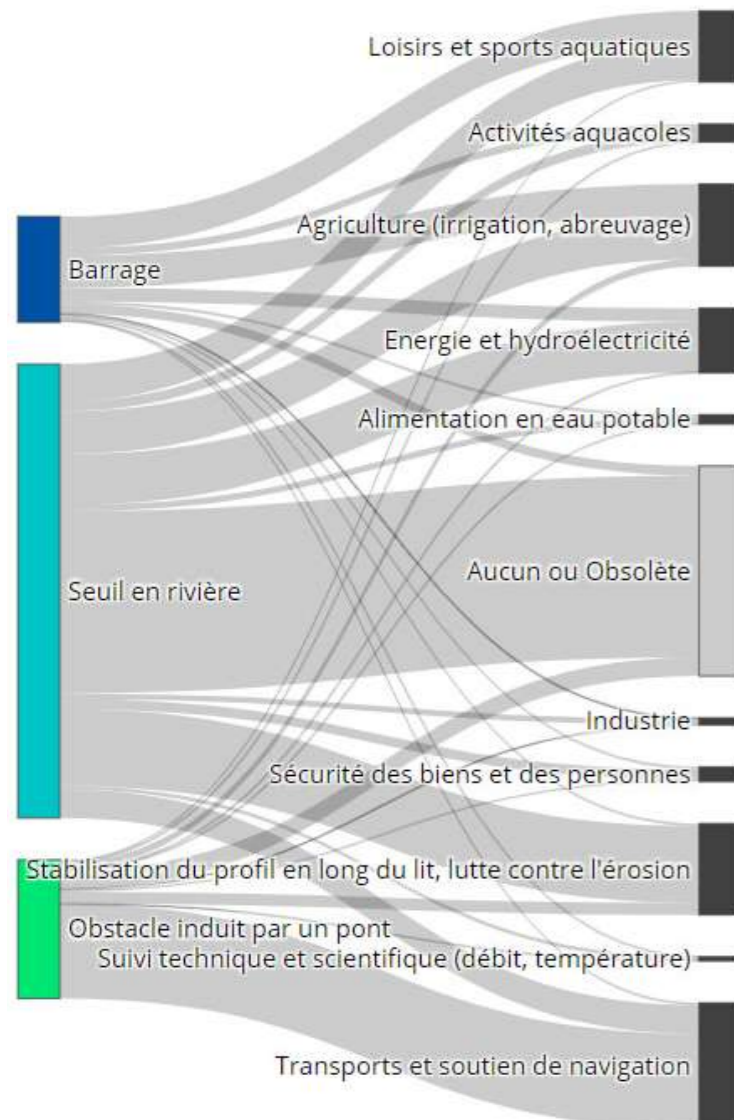


Figure 2: station hydrométrique disponibles en métropole (source hydroportail)

<https://www.hydro.eaufrance.fr/edito/contacts>

Ces stations sont identifiées dans la banque hydrologique nationale, opérée par les services de l'Etat. Les propriétaires/exploitants de ces stations sont, soit des services de l'Etat et collectivités, soit des opérateurs privés.

A ce jour, l'exhaustivité des données est de l'ordre de 90%.

Une fois le rapprochement de stations et des ROE par cours d'eau effectué, nous avons récupéré les fiches stations et les modules et débits spécifiques pour chacune d'entre elles.

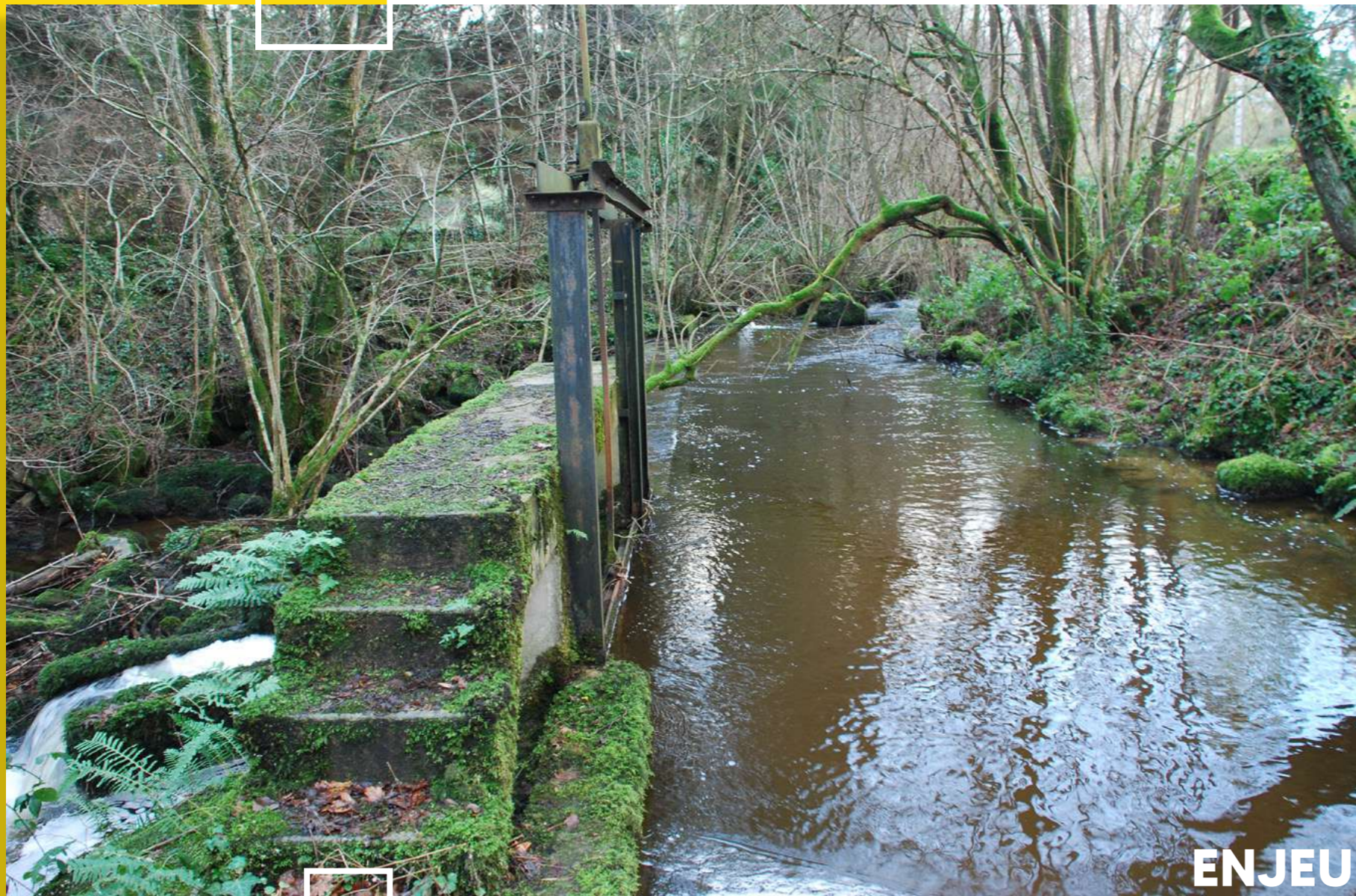
LIMITES STATIONS

le position géographique est réalisé à partir de la donnée «PK» qui est parfois absente. (qui correspond à la position de la station dans le linéaire du cours d'eau avec méthodologie de calcul uniformisé) pour toutes les stations.

Absence de station sur les petits cours d'eau.

Afin de reconstituer le bassin versant sur chaque ROE, la base de données BD ALTI® a été utilisée, modèle numérique de terrain (MNT) maillé qui décrit le relief du territoire français à moyenne échelle.

Dans cette base, nous récupérons le relief, les nœuds hydrauliques, bassins versant des cours d'eau, informations administratives....



ENJEU

La BD ALTI avec un pas de 75m a été utilisée, ce qui ne permet pas une résolution fine pour le calcul des bassins versants et de détermination des pentes. Les fichiers de données sont très lourds et difficiles à charger sans matériel informatique puissant.

EVALUATION DE LA CAPACITÉ À PRODUIRE DE L'ÉLECTRICITÉ PAR UN MOULIN

UN MOULIN A UNE CAPACITÉ DE PUISSANCE ÉLECTRIQUE QUI DÉPEND DE LA HAUTEUR D'EAU DE SA CHUTE ET DU VOLUME D'EAU QUI PASSE DANS SA MACHINERIE. **LA FORMULE* UTILISÉE EST :**

* cette formule tient compte de la perte de charge et de rendement de conversion de la force motrice de l'eau en électricité

$$P \text{ [kW]} = 8 \times Q_{\text{équipement}} \text{ [m}^3\text{/s]} \times h \text{ [m]} \\ \text{(module-débit réservé)}$$

D'après les acteurs de la filière, il est difficile de produire de l'énergie à l'aide d'une turbine si la chute est inférieure à 1,25m, (Cf retour Turbiwatt¹²) Il est néanmoins possible d'utiliser la « **technologie roue de moulin** » pour **exploiter des chutes plus modestes** avec un minimum de 0,5m. Dans ce cas, la performance est moins optimisée, avec un facteur de conversion compris entre 4 et 7 fois le produit de la hauteur et du débit. Pour une raison de simplification, l'évaluation de puissance s'est limitée à l'utilisation d'une turbine.

- Le calcul de la puissance qui correspond à un débit d'énergie a été minoré du débit laissé dans le lit de la rivière (débit réservé) équivalent à 10% du débit moyen interannuel.

- Le productible est le produit de la puissance par un temps. Dans son rapport récent¹³ relatif aux coûts et rentabilités de la petite hydroélectricité, la CRE** relevait une forte variabilité du nombre d'heures annuelles d'équivalent pleine puissance (HEPP), compris entre 2 000 et 4 300 heures pour 75 % des installations existantes en métropole. La majorité des projets étant des basses chutes et **dans le contexte de stress hydrique croissant**, une moyenne de **3500 HEPP est considérée**. La formule utilisée est :

$$E \text{ (KWh)} = P \text{ (kW)} * 3500 \text{ h}$$

**CRE : Commission de régulation de l'énergie

Cette méthode pour estimer le potentiel présente comme défaut le fait que la hauteur de seuil du ROE n'est qu'une information partielle. Certains moulins, que ce soit en zone à forte pente ou en plaine, peuvent en effet avoir un seuil très modeste mais une chute appréciable car la chambre d'eau est installée plusieurs dizaines à centaines de mètres en aval du canal d'entrée du bief ou d'une conduite forcée.

ANALYSE MACRO À L'ÉCHELLE DE LA FRANCE MÉTROPOLITAINE

PRINCIPE - ÉVALUATION MACRO

À partir de la base de donnée ROE, nous avons évalué le productible des moulins en mettant au point un outil de traitement. Partant du constat que plus de 50 % des obstacles à l'écoulement sont sans usage et/ou sont renseignés d'une façon incomplète ou erronée (notamment les hauteurs de chute) nous avons réalisé d'une part une analyse cartographique pour déterminer si les obstacles à usage inconnu pourraient être liés à un moulin et d'autres part avons effectué un rapprochement statistique avec la densité historique des moulins.



LE TOUT PERMETTANT D'AFFINER LE GISEMENT HYDROÉLECTRIQUE HORS CHUTE INFÉRIEURE À 1,25M
 CI-DESSUS LE SCHÉMA MÉTHODOLOGIQUE SUIVI.



DÉTAILS DU TRAITEMENT

LE TRAITEMENT DES DONNÉES A ÉTÉ EN PARTIE AUTOMATISÉ SOUS PYTHON.

1 Les tris/filtres, effectués permettent de supprimer les lignes relatives aux ouvrages détruits, les obstacles induits par un pont, les buses, busage et les centrales hydroélectrique existantes. Les ROE ont été sélectionnés pour une hauteur de chute minimale de 1,25 mètre. La détermination du module se fait en partie via l’outil cartographique QGIS (table d’attributs et outil calculatrice) qui donne le BV* des projets (formule de Qprojet= Rapport de BV débit station), comparé au fichier de données des études de débit antérieures. Il est déduit du module exploitable, le débit réservé (équivalent à 10%). La puissance et l’énergie sont calculées selon les formules ci-dessus. **Sont considérées, les puissances comprises entre 3kW et 500 kW uniquement.**

*BV : Bassin Versant

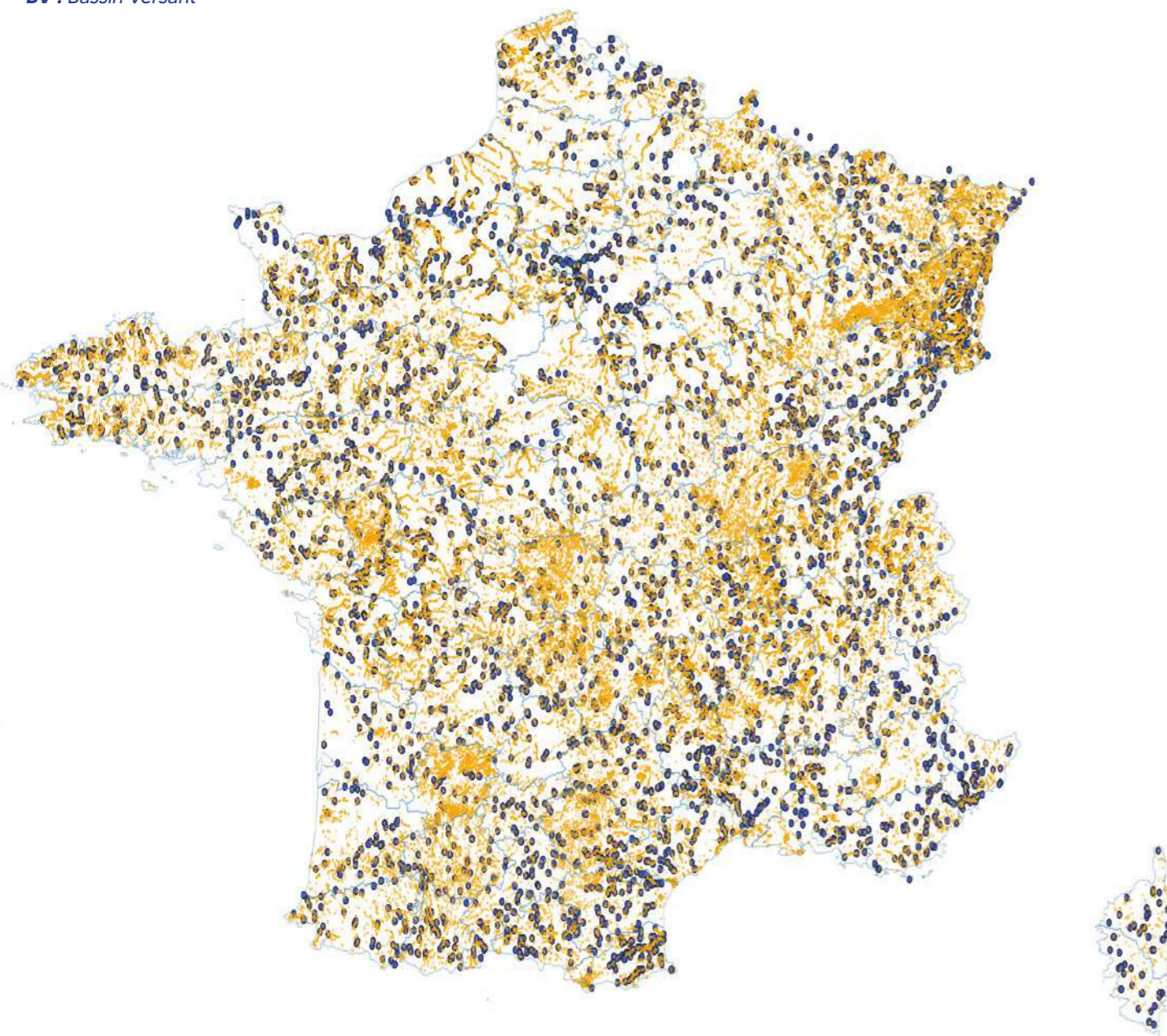


Figure 3 : outils QGIS de traitement cartographie et détermination des longueurs de cours d'eau, bassin versant, facteur PK

ObstEcou1 — Total des entités: 111685, Filtrées: 111685, Sélectionnées: 0

gid	CdObstEcou	StObstEcou	CdModeVali	LbModeVali	CdEtOuvrag	LbEtOuvrag	NomPrincip	NomSeconda	CdTypeOuvr	LbTypeOuvr	CoordXPoin	CoordYPoin	TypeCoordP	CdTypeD
1	1	ROE1	Validé	0	Validé point par...	3	Détruit partielle...	ancien r					26	NULL
2	3	ROE3	Validé	0	Validé point par...	2	Existant	Barrage					26	NULL
3	4	ROE4	Validé	0	Validé point par...	3	Détruit partielle...	déversoi					26	NULL
4	5	ROE5	Validé	0	Validé point par...	3	Détruit partielle...	Ancien r					26	NULL
5	6	ROE6	Validé	0	Validé point par...	3	Détruit partielle...	RADIER					26	NULL
6	7	ROE7	Validé	0	Validé point par...	3	Détruit partielle...	VANNAC					26	NULL
7	9	ROE9	Validé	0	Validé point par...	NULL	NULL	seuil de					26	NULL
8	10	ROE10	Validé	0	Validé point par...	NULL	NULL	NULL					26	NULL
9	12	ROE12	Validé	0	Validé point par...	NULL	NULL	écluse n					26	NULL
10	15	ROE15	Validé	0	Validé point par...	2	Existant	Ancien r					26	NULL
11	16	ROE16	Validé	0	Validé point par...	3	Détruit partielle...	Ancien r					26	NULL
12	17	ROE17	Validé	0	Validé point par...	3	Détruit partielle...	Ancien r					26	NULL
13	18	ROE18	Validé	0	Validé point par...	2	Existant	Passage					26	0
14	19	ROE19	Validé	0	Validé point par...	2	Existant	Ancien s					26	0
15	20	ROE20	Validé	0	Validé point par...	2	Existant	Ancien s					26	0
16	21	ROE21	Validé	0	Validé point par...	3	Détruit partielle...	ANCIEN					26	NULL
17	26	ROE26	Validé	0	Validé point par...	2	Existant	Barrage					26	0
18	28	ROE28	Validé	0	Validé point par...	2	Existant	Enroche					26	NULL
19	29	ROE29	Validé	0	Validé point par...	2	Existant	Seuil de					26	NULL
20	30	ROE30	Validé	0	Validé point par...	2	Existant	Seuil du moulin...	NULL	1,2	Seuil en rivière	914038,797445... 6904294,93182...	26	9
21	35	ROE35	Validé	0	Validé point par...	4	Détruit entière...	Seuil du moulin...	NULL	1,2,3	Seuil en rivière ...	939515,669091... 6928296,25568...	26	0
22	37	ROE37	Validé	0	Validé point par...	NULL	NULL	moulin de petit...	NULL	NULL	NULL	939519,403190... 6928909,73513...	26	NULL
23	38	ROE38	Validé	0	Validé point par...	2	Existant	Barrage de Gan...	NULL	1,2,2	Seuil en rivière r...	928158,588230... 6912257,10690...	26	0
24	39	ROE39	Validé	0	Validé point par...	2	Existant	Seuil de Romba...	NULL	1,2,3	Seuil en rivière ...	925857,894270... 6911077,15954...	26	0

Figure 4 : outil QGIS utilisation du mode calcul à partir des tables d’attributs pour le calcul des BV, PK

Fichier Edition Rechercher

Nouveau Fichier...

Rechercher:

```

##### élimination des buses, ponts, busages #####
for elt in l:
    if "Bus" not in elt[7]:
        if "bus" not in elt[7]:
            if "pon" not in elt[7]:
                if "Pon" not in elt[7]:
                    if "Bus" not in elt[9]:
                        if "bus" not in elt[9]:
                            if "pon" not in elt[9]:
                                if "Pon" not in elt[9]:
                                    if "Detruit entierement" not in elt[6]:
                                        liste.append(elt)
                                        nbre_roe_calcule += 1
##### calcul débit #####

puissance_totale = 0

for elt in liste:
    long = elt[12]
    lat = elt[13]
    for key,value in river.items():
        if key==elt[27]:

```

Figure 5: outil de traitement, exemple manipulation PYTHON

2 Construction de fichiers KML (depuis PYTHON) en ne retenant que les obstacles supérieurs à 1,25 m « LbHautChut », action qui a nécessité la conversion des coordonnées au format Lambert 93 en coordonnées « WGS 84 » puis import du fichier dans Géoportail.

3

Recherche des moulins référencés sur la carte de Cassini ayant une correspondance géographique avec les ROE. Puisque le travail de correspondance se fait manuellement, 3 départements choisis arbitrairement ont été retenus ; la MANCHE, LA CORREZE (partie) et LA MEUSE.

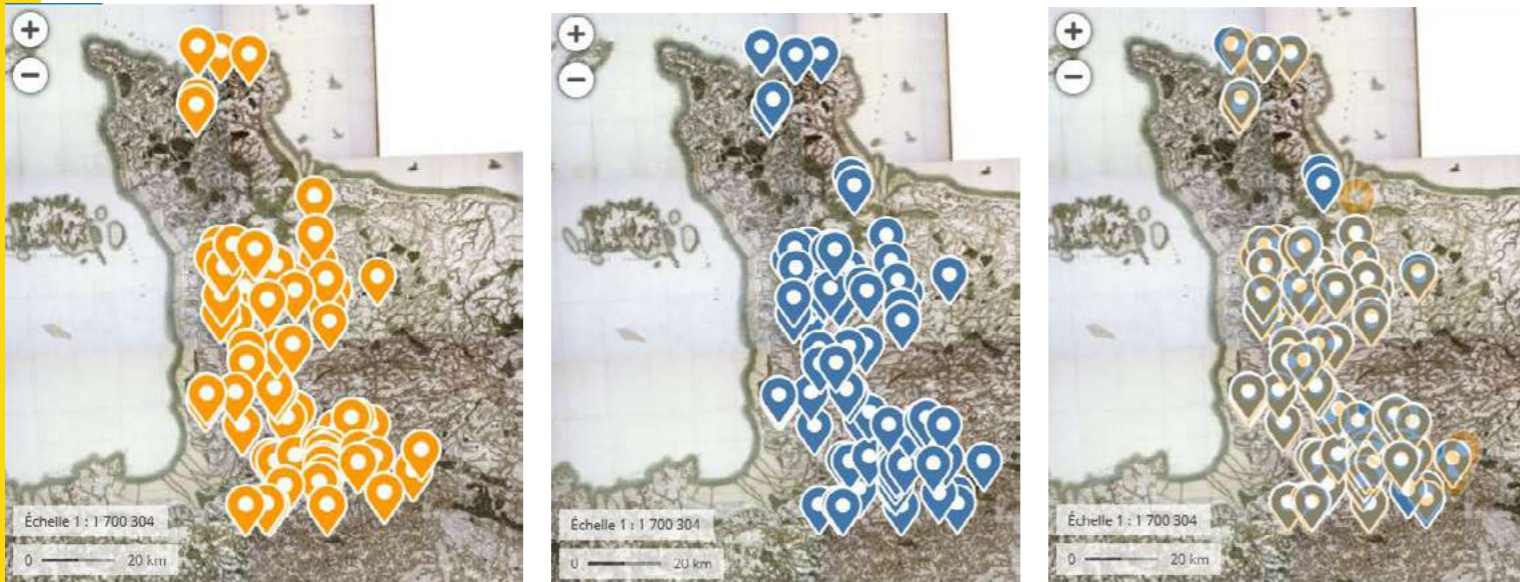


Figure 3 : Capture d'écran de la localisation des moulins et des ROE dans la Manche sur fond de carte de Cassini (A gauche, les moulins historiques, au centre les ROE supérieur à 1,25 mètres, à droite les deux calques en transparence)

Comptage des ROE d'une hauteur de chute supérieure à 1,5 mètre et des moulins référencés sur Cassini qui ont la même position.



Figure 4 : Correspondance de localisation entre les moulins référencés sur Cassini et les ROE (Meuse à gauche et Corrèze à droite)

	Meuze	Corrèze	Manche
ROE	124	139	92
MOULINS MÊMES POSITIONS	85	84	72
RATIO	0,68	0,60	0,78

Les comptages montrent que dans la majorité des cas, les ROE correspondent à la localisation d'un moulin historique avec un ratio de 70%. On notera qu'il a fallu passer un temps considérable pour traiter les doublons qui augmentaient virtuellement le nombre de ROE (exemple ci-après).

Figure 5: outil traitement exemple manipulation PYTHON

ancien moulin de Sey		Résultats de la recherche		
G		Feuille	Cellule	Contenu
	Decharge de l'ancien mo			74404
	Decharge du moulin de l			87459
partiellement	Seuil de derivation de l'a	MANCHE	\$H\$130	77453
	Decharge de l'ancien mo			68448
	Chute du moulin du Fieff	MANCHE	\$H\$453	65417
	Chute de l'ancien moulin			76458
	Seuil de derivation de l'a	MANCHE	\$H\$454	63192
partiellement	Chute du canal de fuite c			63378
	Chute du moulin de la Cc			63268
	Decharge de l'ancien mo			67978
partiellement	Prise d'eau AEP de la La			65854
	Decharge de l'ancien mo			64425
entierement	Ancien seuil du Grand M			73062
partiellement	Chute de l'ancien moulin			72405
	Chute motrice du moulin			85971
entierement	Chute de l'ancien moulin			84098
partiellement	Decharge de l'ancien mo			82819
	Chute droite de l'ancien r			82840
	Chute gauche de l'ancien			82836
	Chute de l'ancien moulin			79781
	Chute motrice du moulin			68758
	Seuil aval du moulin de l			75854
	Chute de l'ancien moulin			76307
entierement	Seuil de derivation de l'a			87670
partiellement	Chute de l'ancien moulin			87670
partiellement	Chute de l'ancien moulin			87895
	Chute du moulin de la Hé			77028
	Chute du moulin de l'Orb			74588
	Chute de l'ancien moulin			74419
	Chute de l'ancien moulin			72589
	Chute de l'ancien moulin			71850
partiellement	Chute de l'ancien moulin			74614
	Chute de l'ancien moulin			71758

4 résultats trouvés

Afficher ce dialogue

Fermer

RÉSULTAT DU POTENTIEL MACRO DE LA FRANCE MÉTROPOLITAINE

DONNÉES BRUTES
103 867 ROE
POTENTIEL MOULINS ?

Traitement

5 128 MOULINS
156 MW
0,54 TWh

Extrapolation 1

Puisque 15 228 ouvrages sont sans affectation dans la base ROE et que nous avons pu constater que 10 659 (correspondant à 70%) de ces ouvrages sont vraisemblablement des moulins historiques, on obtient en application des ratios utilisés précédemment **l'équipement potentiel de 10 235 moulins représentant une puissance installable de 339 MW** (33 kW de puissance moyenne par site avec $P_{min} = 3kW$ et $P_{max} = 500 kW$) **pour 1,2 TWh d'énergie produite.**

Dans la base ROE, **20 683 moulins** sont répertoriés comme existants et non producteurs d'énergie (déduction faite également de projets dont la puissance potentielle développée serait supérieure à 500 kW). Sur ces 20 683 moulins, 66% ont une hauteur de chute (valeur précise) renseignée et 37% disposent d'une hauteur de chute supérieure ou égale à 1,25 m, soit **5 128 sites équipables**. Dès lors, le gisement de puissance atteint **156 MW, soit 0,546 TWh** de production d'énergie pour les moulins disposant d'une hauteur de chute renseignée et supérieure à 1,25m. Dans la mesure où l'on applique la proportionnalité de ces derniers résultats aux moulins dont la hauteur de chute n'est pas connue, on obtient **l'équipement de 7630 moulins représentant 235 MW et 0,822 TWh de productible.**

7 630 MOULINS
235 MW
0,82 TWh

Extrapolation 2

RÉSULTATS
10 235 moulins à équiper
339 MW 1,2 TWh

comprend le respect du débit réservé

LIMITES DE L'ÉVALUATION

**MODULE : Débit inter-annuel*

Les dénominations d'obstacles sont très disparates. De nombreux ouvrages se répètent (jusqu'à cinq référencements et dénominations pour un même obstacle) ce qui induit virtuellement un nombre plus conséquent de ROE (estimé à environ 30%). Beaucoup d'informations sont incomplètes, ce qui augmente le risque d'erreurs.

Les pentes calculées n'ont pas permis de reconstituer les hauteurs de chutes manquantes. La reconstitution du débit n'a pas été possible sur les petits bassins versants. L'évaluation de la puissance selon le débit interannuel est **réductrice**, certains moulins pourraient être équipés au-delà du module* tout comme pour des chutes inférieures à 1,25m, comprenant notamment des canaux et/ou conduite.

Vérifier manuellement que les ROE correspondent à des emplacements de moulins historiques est fastidieux (écart de distance jusqu'à 100 mètres étant donnée la faible précision de cassini). L'utilisation de données d'archives n'a finalement pas été nécessaire pour cette évaluation. On peut tout de même s'interroger sur l'écart qui existe entre la statistique impériale de 1809 (source Archives Nationales, F 20 560) fournie par le ministère de l'intérieur qui répertorie 82 300 moulins à eau et les 20 683 comptabilisés aujourd'hui .

CONCLUSION

DU POTENTIEL MACRO DE LA FRANCE MÉTROPOLITAINE

Met en évidence un gisement d'au moins 1,2 TWh/an (**incluant le respect du débit réservé**). Bien que le plus grand soin fût apporté à ce travail de modélisation complexe, l'analyse du potentiel des moulins n'a pu se faire que partiellement, en particulier faute d'une base de données ROE fiables et complètes.

AUSSI, NOUS ALLONS TENTER D'AFFINER CE RÉSULTAT AVEC UNE ANALYSE PLUS DÉTAILLÉE, NOTAMMENT FOCALISÉE SUR LE POTENTIEL DES CHUTES DONT LES SEUILS SONT INFÉRIEURS À 1,5M.



Pour combler les manques identifiés dans l'analyse macro, réduire les incertitudes et pour évaluer le potentiel des chutes ayant un obstacle inférieur à 1,25 m (tenter de confirmer les usages indéterminés et détecter d'éventuels ROE oubliés) nous avons élaboré une méthodologie visant à échantillonner le potentiel précis d'un secteur qui puisse être représentatif, pour l'étendre au territoire métropolitain.



DONNÉES TRAITÉES POUR L'ÉCHANTILLONNAGE.

POUR CETTE ÉTUDE, LE DÉPARTEMENT DE **LA MANCHE** A ÉTÉ RETENU. CE CHOIX EST FAIT POUR LES RAISONS SUIVANTES :

- Il est précédemment étudié dans le cadre de l'analyse « macro » des moulins sur Cassini,
- car son relief sillonné de collines qui s'élèvent graduellement du nord au sud, permet une typologie de moulin de « plaine » à des « torrents » représentatif du territoire,
- pour la richesse des données hydrologiques comblant nos besoins notamment sur le fait que la position de la station hydrométrique est mesuré en pk* directement en accord avec celle des ROE,
- Puisque nous avons des éléments d'archives et notamment une carte de 1904 localisant les moulins dans la Manche et évaluant le potentiel de la force motrice,
- Parce que, ce département est considéré comme « territoire peu propice à la production hydroélectrique » (Cf comptes rendus de SDAGE), il était donc aussi intéressant de vérifier cette affirmation,
- Enfin et surtout puisque la FFAM pouvait mettre à disposition des adhérents pour contrôler sur le terrain l'expertise cartographique.

*pk correspond à une abscisse curviligne du point caractéristique en amont du site hydrométrique en utilisant les références pK du tronçon hydrographique élémentaire de la BD CARTHAGE sur lequel est situé le site. Plus la valeur est grande, plus le site est situé en aval du cours d'eau.

SCHÉMA DE L'ANALYSE AFFINÉE DU POTENTIEL

DONNÉES DÉPARTEMENT DE LA MANCHE



Relief varié | Hydrologie (avec PK) | Données historiques | SDAGE | Expertise de terrain

HydrPortail | BDD HYDRO et ROE et sites hydroélectriques | SANDRE

CARTE DE CASSINI | géoportail | Kml | OUTILS DE TRAITEMENT | PYTHON | Suppression doublon/sites équipés/détruits | Débit - puissance - Energie

Expertise terrain | Correction manuelle | Tableur RÉSULTAT > 1,5 | Tableur RÉSULTAT < 1,5

BDD historique moulins 1900 | Archives Manche | Kml/Excel | Synthèse avec facteur multiplicatif au territoire

DU TRAITEMENT

DÉTAIL

LE TRAITEMENT DES DONNÉES A ÉTÉ EN PARTIE AUTOMATISÉ SOUS PYTHON.

Le processus de détermination de la puissance est similaire à l'évaluation précédente (analyse macro), au point près que la modélisation du débit c'est uniquement faite en fonction de la position « pk » des ROE dans la rivière. Dans le cas des cours d'eau/ruisseau sans station de suivi hydrologique, une modélisation mathématique de la surface du bassin versant a été réalisée à partir de la longueur du cours d'eau et de la surface totale du bassin versant.

Par ailleurs, dans la base ROE, **les intervalles de hauteur de chute** ont été utilisés plutôt que la valeur exacte (plus souvent absente). Les ROE ont été classés de la façon suivante :



Les ROE dont la hauteur de chute est inférieure à 0,5m, **écartés du calcul** pour simplifier le traitement, bien qu'ils puissent avoir un potentiel hydroélectrique (notamment via une dérivation des eaux et/ou une technologie de valorisation à partir des roues); Comme exemple de cas nous trouvons dans le référentiel ROE l'« Ouvrage de dérivation du moulin de Torte Planche » d'une hauteur de 0,42m, pour en réalité une chute exploitée de 3,9m sur la Sée) ;

Les ROE dont la hauteur de chute est comprise entre 0,5 et 1,5m. Dans ce cas il a été considéré, une chute équivalente à 1,5m par défaut, puisque nombre d'entre eux sont très majoritairement équipés d'une dérivation des eaux (bief, canal d'aménagé et/ou fuite, une conduite forcée.).

Dans la mesure où le débit n'a pas pu être calculé, ou bien si l'expertise terrain montre l'absence d'une chute au moins équivalente à 1,25m nous avons fixé arbitrairement la puissance à 3kW en se basant sur le fait que cette puissance était le minimum pour faire tourner un moulin historique. On peut signaler que 3kW est le niveau de puissance en crête installée en solaire chez les particuliers avec le soutien de l'état, ce qui en fait un point de comparaison d'un point de vue de puissance.

Les ROE présentant une hauteur de chute supérieure à 1,5 mètres de haut, ayant été en grande partie expertisés pour confirmer la hauteur de chute précise nécessaire pour le calcul de la puissance.

Les ROE dont la chute est indéterminée, pour lesquels nous avons pu constater sur certains d'entre eux une chute au moins équivalente à 1,25m.

PLUS PRÉCISÉMENT, LES DÉMARCHES ENGAGÉES ONT ÉTÉ LES SUIVANTES :

1

Supprimer des ROE « détruits », et qui ne sont pas des moulins (busages, route, lavoir, ponts, seuil routier, AEP, STEP, Etang, radier de pont).
Éliminer des ROE déjà en exploitation (**LbUsageObs**: «Energie et hydroélectricité» ; comparaison avec base statistique des ouvrages hydroélectriques.

Au total, c'est plus de 40 conditions programmées qui ont permis **d'isoler les moulins potentiels.**

2

Détecter les obstacles qui se répètent, via l'altimétrie (ouvrages même altitude), via des termes similaires dans leurs descriptifs et en fonction de la colonne « OuvrageLie » ; puis unique sélection du ROE qui comprend la hauteur de chute la plus importante.

3

Faire correspondre localisation des ROE avec les rivières, détermination du débit au droit du ROE à l'aide de la modélisation mathématique.
Dissociation des projets (1) inférieur à 0,5, (2) compris entre 0,5 et 1,5m, (3) supérieur à 1,5 et (4) indéterminés pour appliquer le calcul de puissance correspondant.

4

Créer des fichiers « tableur » et cartographiques pour faciliter l'analyse des résultats après conversion en données WGS84,

5

Contrôler les résultats avec expertise de terrain et comparaison aux données d'archives et base de données centrales hydroélectriques.

6

Extrapolation des résultats du département de la Manche à la France métropolitaine

DU POTENTIEL AFFINÉ

La base ROE de la Manche comprend 762 obstacles ; 68 sont renseignés comme « détruits totalement » (dont 4 centrales hydroélectriques) et 166 sont renseignés comme « partiellement détruits », **soit 694 ROE à traiter**. La répartition et la localisation des ROE est la suivante :

ONT UNE CHUTE SUPÉRIEURE OU ÉGALE À 1,5M

135

ONT UNE CHUTE ENTRE 0,5 ET 1,5M

163

ONT UNE CHUTE INDÉTERMINÉE

184

ONT UNE CHUTE INFÉRIEURE OU ÉGALE À 0,5M

212

RÉPARTITION DES CHUTES

● CHUTE \leq 0,5M

0,5 \leq CHUTE \leq 1,5M

● CHUTE \geq 1,5M

● CHUTE INDÉTERMINÉE

CARTE ET HISTOGRAMME DE RÉPARTITION DES ROE DANS LA MANCHE (DÉDUCTION FAITE DES BUSES ET PONT)



SUR 694 ROE ANALYSÉS SEULS 262 CONCERNENT DES MOULINS. SELON LE CLASSEMENT ADOPTÉ ON OBTIENT :

CdObstEcou	LbEtOuvrage	Nom Principal ObstEcou	LbHautChutClobstEco	Entite Hydro
ROE8375	Détruit entièrement	ancien seuil centrale de Fourneaux	inférieure à 0,5m	fleuve la vire
ROE54487	Détruit entièrement	ancien seuil centrale de Candol	inférieure à 0,5m	fleuve la vire
ROE54492	Détruit entièrement	ancienne centrale de Fourneaux	inférieure à 0,5m	fleuve la vire
ROE72864	Détruit entièrement	ancien barrage de la microcentrale La Foret	inférieure à 0,5m	rivière le lair

CAS DES ROE <= 0,5M (1)

60 chutes sont concernées. Nous avons été extrêmement surpris de constater que plusieurs centrales hydroélectriques récemment détruites comprenaient des chutes inférieures à 0,5 m.

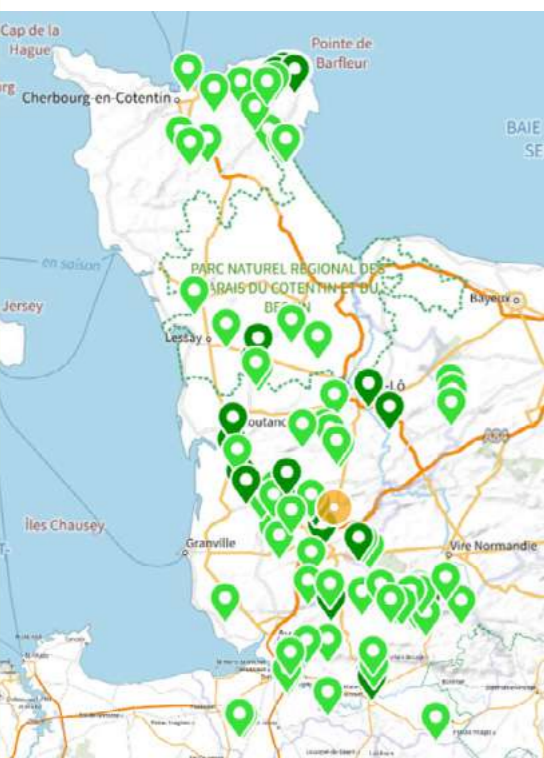
En effet ces centrales profitaient de dérivations, ce qui met en évidence que **même les ouvrages inférieurs à 0,5m pourraient comprendre des chutes au moins équivalentes à 1,25m.**

Bien que ces chutes pourraient permettre de produire de l'électricité via une dérivation augmentant la hauteur de chute exploitable (comme l'exemple ci-dessus) ou en utilisant la technologie « roue de moulin » (charge d'eau nécessaire pouvant être inférieure à la turbine) **nous avons préféré ne pas considérer cette puissance potentielle pour être conservateur** d'une part et puisque nous avons pu constater que les ouvrages sont le plus souvent dans un état dégradé d'autre part.

CAS DES ROE COMPRIS ENTRE 0,5 ET 1,5M DE CHUTE (2)

Dans la continuité des explications concernant les ouvrages inférieurs à 0,5m puisque historiquement, des dérivations ont été construites pour cumuler la pente du terrain et ainsi obtenir des hauteurs de chute plus conséquentes et des moulins plus puissants, nous avons effectué un contrôle cartographique complété de certaines visites pour rechercher les gains de chute exploitables par un bief, des canaux, une conduite...

71 CHUTES SONT CONCERNÉES ET REPRÉSENTENT 1640 KW DE PUISSANCE ÉLECTRIQUE.



Pour illustrer la situation, nous avons pris comme exemple le ROE 25209, qui correspond au moulin de la Foulérie commune de Villedieu les Poeles. Depuis Géoportail nous avons identifié une dérivation (représentée en bleu ci-dessous d'une longueur d'environ 60m), existence confirmée lors de l'audit via un canal sous une usine.



Dans le ROE il est indiqué 1,36 m de chute, alors que d'après nos mesures, le seuil (vanne fermée) génère une chute de 2,35 m. De plus la hauteur finalement exploitable est supérieure à 2,8 m.



Figure 7 : photo en partie aval du seuil de la Foulérie réalisée à l'été 2022

CAS DES ROE RÉFÉRENCÉS AVEC UNE HAUTEUR DE CHUTE DE PLUS DE 1,5 M (3)



À l'examen des puissances calculées, il est apparu des anomalies qui proviennent de données fausses. Le pk de certains ROE est erroné et n'est pas en accord avec la position GPS du ROE. Souvent, le pk place anormalement le ROE proche de l'estuaire ce qui rend le calcul de la surface du bassin versant fausse et donc une puissance anormalement élevée. Aussi, un tri des données supplémentaire a été intégré au programme pour éliminer du calcul ces données.

Ainsi sur cette base, il apparaît que seuls 66 ROE ont été pris en compte représentant **une puissance totale de 1929 kW.**

On notera que les ROE de la Chapelle sur Vire, Candol, Tessy bocage, la Mancellière, anciens moulins convertis en centrale ont récemment été détruits et n'étaient pas comptabilisés dans la base ROE. Au total, déduction faite de la destruction des barrages de Vezin et de la Roche qui boit (14000 kW - 27 GWh) c'est plus de 1 673 kW de

puissance anéantie représentant près de 6 GWh de production annuelle (équivalent à 2500 toitures photovoltaïques) dans le cadre de l'effacement des ouvrages dans la Manche.

CAS DES ROE « MOULINS ORPHELINS »

L'analyse de la base de données montre qu'il existe des ROE avec dénomination « moulin » sans données (intervalle de hauteur indéterminé) ou avec des données erronées (notamment le pk, nom de la rivière...). Ces ROE seront dits « orphelins ». L'outil informatique ne peut donc pas être mis en œuvre pour calculer leur puissance mais permet de les retrouver cartographiquement. Dans la Manche, ils sont au nombre de 65.

Pour les prendre en compte, il est possible d'agir manuellement pour améliorer la base de données. Mais cette méthode est chronophage et nécessite une analyse des archives et une bonne connaissance des sites pour être menée à bien.

Cependant, il a été possible de retrouver une partie des données nécessaires à savoir le nom de la rivière. Ce travail a ainsi permis à des ROE de plus de 1,5m « orphelins » de ne plus l'être et d'avoir une puissance calculable. La correction manuelle a ainsi permis de diminuer le nombre de ROE « orphelins » de 65 à 36.

AINSI LA PUISSANCE QUE POURRAIT ATTEINDRE CES SITES EST AU MOINS ÉQUIVALENTE À 517 KW.



CAS DES ROE NON RÉPERTORIÉS

En réalisant l'expertise terrain, il a été constaté que plusieurs moulins de puissance significatives (sur la Cance, sur l'Elle, le Thar,...) ne faisaient pas partie du référentiel ROE, ce qui montre que la base reste incomplète. Néanmoins, pour focaliser notre travail sur les données d'Etat ainsi que pour rester conservateur, nous, n'avons pas considéré ces sites dans le calcul du gisement.



Figure 7 : exemples de sites non référencés sur la base ROE



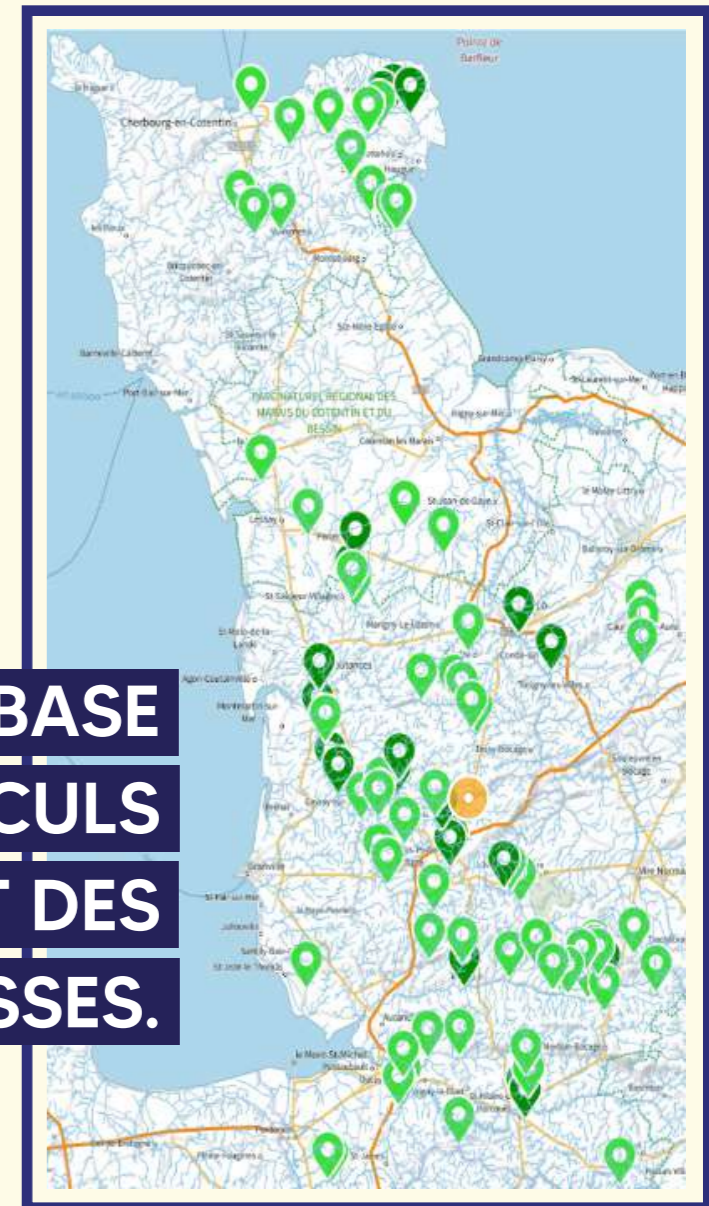
BILAN

DU POTENTIEL HYDROÉLECTRIQUE DES MOULINS DANS LA MANCHE

Le département de la Manche présente une **puissance potentielle hydroélectrique nette de 4086 kW** qui permettrait de générer **14,3 GWh/an** et qui s'ajoute aux 1320 kW - 3 GWh exploités actuellement. La répartition des projets est la suivante :

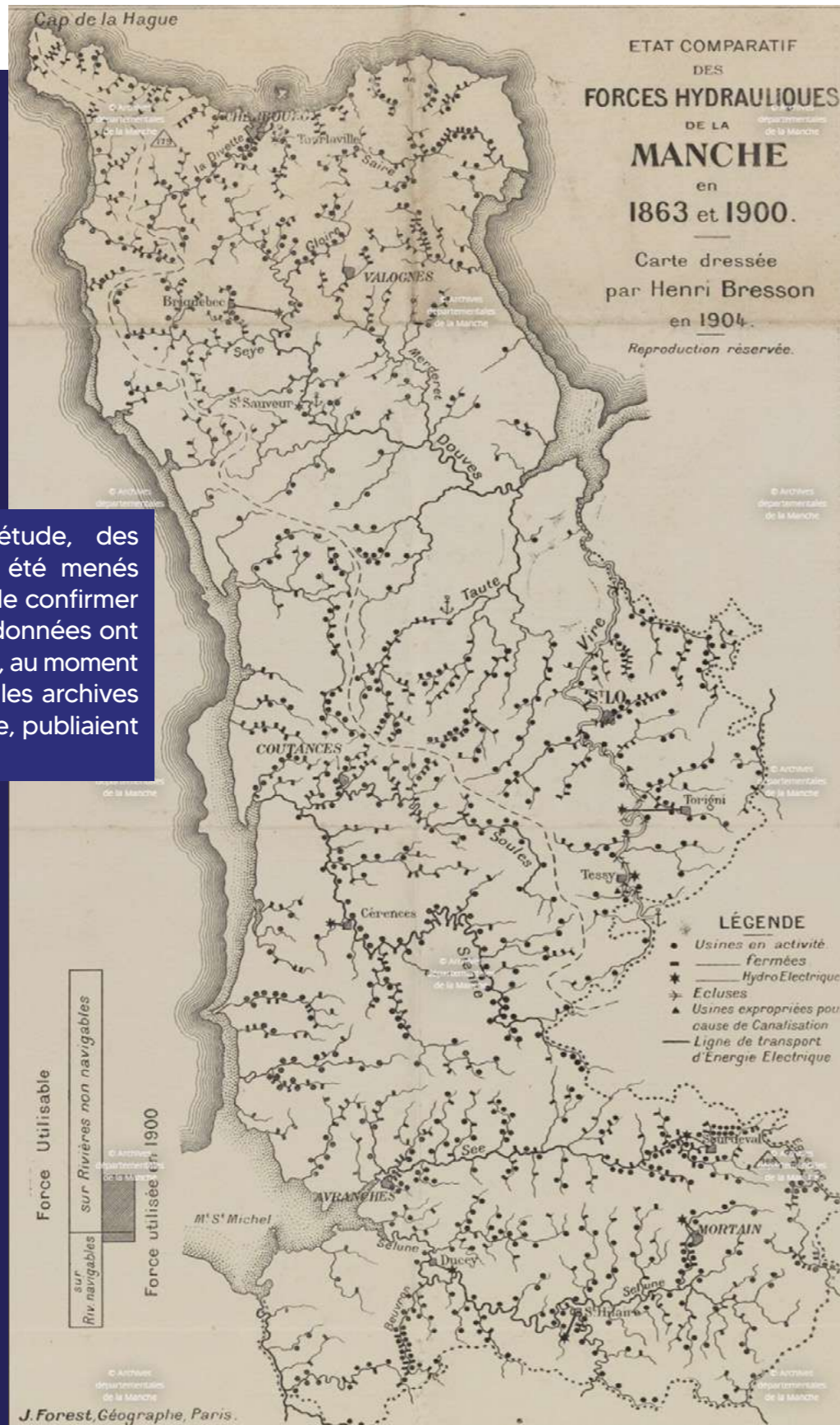
	Puissance (kW)
(1) INFÉRIEUR À 0.5	Non considérés
(2) DE 0.5 À 1.5	1640
(3) SUPÉRIEUR À 1.5	1929
(4) INDETERMINES	517
AUTRES ROE	Non considérés
Total	4086

**CE RÉSULTAT SE BASE
SUR DES CALCULS
COMPRENANT DES
HYPOTHÈSES BASSES.**



Retour dans le passé,

Ouverture sur le potentiel antérieur



Dans le cadre de cette étude, des recherches aux archives ont été menés sur les moulins identifiés afin de confirmer les résultats obtenus. Peu de données ont hélas été exploitables. Toutefois, au moment de la réalisation de ce travail, les archives départementales de la Manche, publiaient le document suivant :

Figure 3 : Un inventaire de la houille blanche dans la Manche. Etat comparatif des forces hydrauliques de la Manche en 1863 et 1900. Carte dressée par Henri Bresson en 1904 et publiée dans un supplément au Mortainais du 7 février 1904.

Ainsi, le département comptait 1986 moulins en 1809, pour arriver à 1307 en 1863 et finir à 705 (569 moulins à mouture, 3 huileries, 39 filatures, 18 scieries, 2 papeteries...), en 1900 ; soit 1281 moulins abandonnés en l'espace d'un siècle.

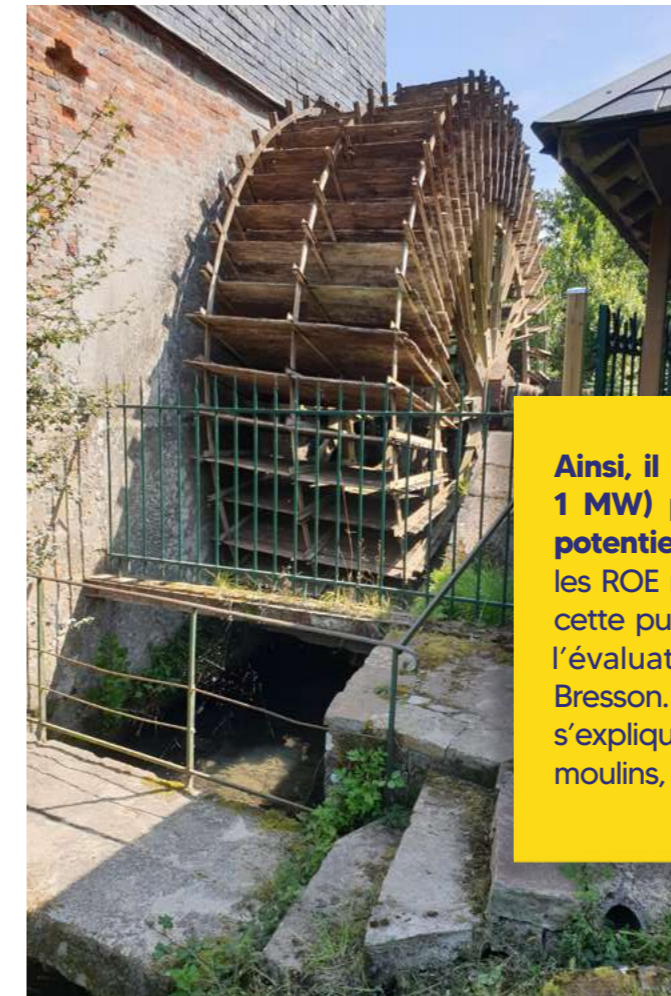
L'auteur explique ce déclin par l'évolution de la mouture passant de l'utilisation de la meule de pierre au cylindre métallique, arrêtant la petite meunerie, la transformation des pratiques agricoles (passage de 92 à 3 huileries), le maintien de « grosses installations » pour développer une force motrice d'au moins 100 CH (76 kW) pour les papeteries notamment. A l'inverse, les débuts de la mondialisation font croître les scieries profitant de l'import de bois de Suède, de Norvège et d'Amérique (...). Mais pour l'auteur, **la principale raison de cet abandon est l'arrivée du pétrole.**

Concernant la situation **en 1900, sont déjà installées 9 turbines** en partie équipées de dynamo pouvant dès lors produire de la lumière (exprimée en bougies) ou faciliter des activités nécessitant la force motrice (cas à Saint hilaire du Harcouet, Tessy bocage, Mortain, Cherbourg). Après ce travail d'inventaire, Henri Bresson **évalue le potentiel hydroélectrique (houille blanche) des moulins à un minimum de 11 000 CV soit un peu plus de 8 MW électrique.**



Ce dernier chiffre est particulièrement intéressant puisque notre étude permet de comptabiliser :

TYPE DE ROE	PUISSANCE (KW)
En exploitation hydroélectrique	1320
Sites hydroélectriques détruits - programme effacement (hors barrages VEZIN et RQB)	1673
Potentiel de développement	4086
TOTAL	7079



Ainsi, il manquerait l'équivalent de 1 017 kW (environ 1 MW) pour retrouver le résultat de l'évaluation du potentiel des moulins en 1904. On pourrait penser que les ROE non identifiés dans la base peuvent représenter cette puissance potentielle manquante ce qui ferait que l'évaluation de 2022 est très proche du travail d'Henri Bresson. Mais il est plus probable que la différence s'explique par la destruction d'un nombre conséquent de moulins, ayant de fait supprimé ce potentiel.

EXTRAPOLATION DES RÉSULTATS DE LA MANCHE À L'ÉCHELLE DE LA FRANCE

D'après nos outils de traitement, les ROE en France métropolitaine (exclusion faite de la Manche) non détruits, sans doublon, correspondant à des moulins non producteurs d'électricité et ayant un intervalle de chute renseigné, se comptabilisent ainsi :

- hauteurs comprises entre 0,5 et 1,5m : **15 777** chutes
- hauteurs supérieures à 1,5 m : **13 204** chutes
- hauteurs indéterminées : **6 859** chutes

Si on applique la moyenne de la puissance par ROE dans le département de la Manche, pour des chutes comprises entre 0,5 à 1,5 m et que nous l'étendons à la France, on obtient 1649 kW/71 ROE soit **23 kW** par ROE.

A l'échelle de la France, cela fait :

$$15\ 777 \times 23 = 364\ 426 \text{ kW}$$

En appliquant le même calcul pour les **ROE > 1,5 m**, on obtient :

$$1929 \text{ kW} / 66 \text{ ROE} = 29 \text{ kW}$$

Sur le même principe, à l'échelle de la France, on trouve :

$$13\ 204 \times 29 = 382\ 916 \text{ kW}$$

ENFIN, APPLIQUÉ AUX CHUTES
INDÉTERMINÉES ON A :

$$517 \text{ kW} / 65 \text{ ROE} = 8 \text{ kW}$$

SOIT UNE PUISSANCE POTENTIELLE
SUR LE TERRITOIRE ÉQUIVALENTE À :

$$6\ 859 \times 8 = 54\ 872 \text{ kW}$$



Au total, en transposant les résultats obtenus sur la Manche à l'ensemble du territoire métropolitain, on obtient un gisement équivalent à 802 MW soit 2,8 TWh de production annuelle.



***Une énergie est dite "verte" lorsqu'elle est à la fois propre et renouvelable, c'est-à-dire qu'elle provient de sources durables et qu'elle n'émet pas ou très peu d'émissions de gaz à effet de serre.**

CONCLUSION DU POTENTIEL AFFINÉ

Le potentiel hydroélectrique de la Manche est supérieur à 4 MW. Il concerne plus de 150 moulins - soit 26 kW de puissance moyenne - qui pourraient être équipés. Le travail pour arriver à ce résultat a été particulièrement complexe et minutieux. Il a nécessité plusieurs recoupements d'informations, de méthodes de traitement et de contrôles de terrain. Près de 40% des ROE de la Manche sont des moulins, une dissociation des projets potentiels par intervalles de hauteurs de chute (et non plus par hauteur précise comme pour l'évaluation macro) a permis de réduire les lacunes de la base et de mieux identifier les gains de chute par dérivation. Nos résultats sont conservateurs, car le potentiel hydroélectrique des moulins ayant une chute inférieure à 0,5 m ou indéterminée, ainsi que les ROE non référencés n'a pas été évalué.

Le potentiel « de la houille blanche des moulins » estimé à 8 MW il y a plus d'un siècle est cohérent avec notre résultat d'analyse, ce qui appuie la cohérence du travail. Par ailleurs, le département de la Manche est représentatif pour caractériser à plus grande échelle les possibilités des moulins. Dès lors, nous avons extrapolé le gisement du département de la Manche au territoire métropolitain.

Le potentiel de développement en France métropolitaine pourrait atteindre 0,8 GW en équipant 35 840 moulins, soit + 2,8 TWh/an « d'énergie verte »*.

Conclusion générale

En cette période d'incertitude énergétique, persuadée de l'intérêt général que représente le patrimoine des moulins, à la fois pour l'écologie de nos rivières, le maintien des eaux en particulier en saisons estivale indispensable à la vie, la FFAM a souhaité mettre à jour les évaluations du potentiel hydroélectrique des moulins à eau de France métropolitaine.

Cette étude a en premier lieu consisté à rechercher les travaux antérieurs afin d'appréhender la méthodologie, les résultats et ses limites. Globalement, la grande majorité de ces études est non spécifique aux moulins et se focalise sur un potentiel théorique en fonction des pentes et des débits. Ces calculs, bien qu'intéressants, identifient un potentiel qui ne prend pas en compte la réalité des ouvrages existants. Le filtre de « l'acceptabilité environnementale » s'ajoute ensuite avec, selon les perceptions, un effet plus ou moins réducteur.

Tout bien considéré, ces études aboutissent à un productible de projets « fourre-tout », qui s'approche du TWh, et ce avec des restrictions de puissances minimum (P>100 kW). Pourtant, ces données servent de socle pour définir notre politique énergétique, retranscrit dans la PPE.

Partant du postulat qu'un moulin interagit avec son milieu depuis plusieurs siècles et qu'il existe des solutions favorables à la protection des écosystèmes pour en exploiter la force motrice, ce rapport essaie **de façon préliminaire**, d'évaluer le gisement hydroélectrique des moulins à eau existant sur les cours d'eau de métropole. Pour ce faire, la base de données du référentiel obstacle à l'écoulement (ROE) a été utilisée, elle comprend un inventaire détaillé et géolocalisé de la grande majorité de ces derniers.

DOCUMENT RÉALISÉ PAR
LE BUREAU D'ÉTUDE EAU'RIGINE

Une première méthode d'évaluation du « potentiel macro » basée sur la concaténation puis le traitement de données hydrauliques, altimétriques, cartographique, études antérieures et historiques, nous permet d'atteindre à **minima une puissance électrique nette développable par les moulins de 339 MW, soit une production d'environ 1,2 TWh/an.**

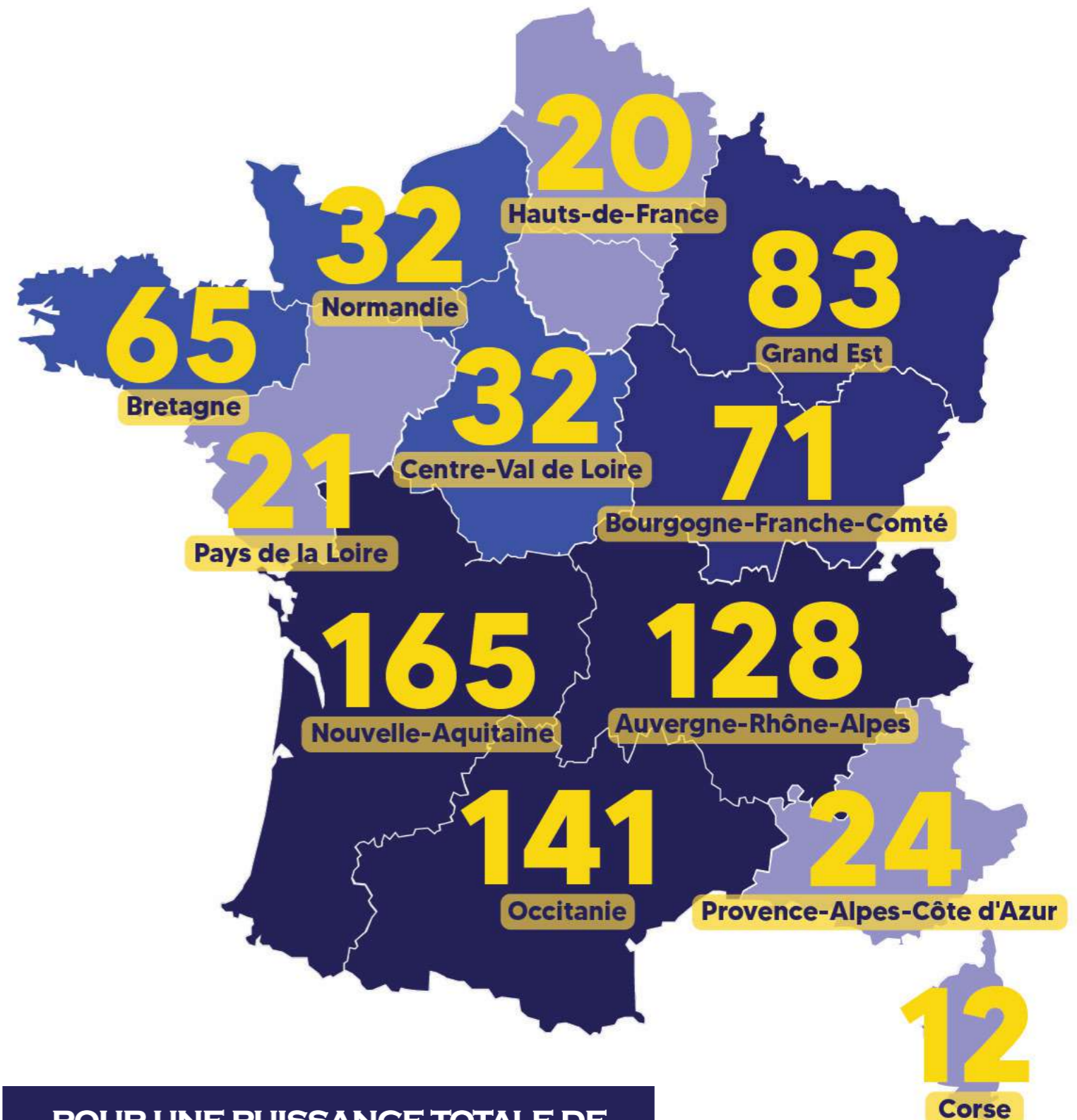
Néanmoins, ce travail a mis en évidence de nombreux « trous dans la raquette » que la méthode d'analyse a tenté de combler dans l'évaluation du « potentiel détaillé ». Ainsi, le gabarit du département de la Manche (en Normandie) a été utilisé. L'analyse des données a été renforcée par une méthodologie plus fine et des traitements plus complexes, le tout complété par des expertises de terrain. En complément, un travail d'archives a permis de confirmer les chiffres obtenus afin de les extrapoler à l'ensemble du territoire. Ainsi, il serait possible d'équiper près de 36 000 moulins représentant une puissance qui s'approche de celle d'un réacteur de centrale nucléaire ancienne génération (900 MW). **Précisément, avec cette méthode et en restant conservateur, le patrimoine de nos rivières pourrait développer 800 MW électriques (22 kW moyens) pour 2,8 TWh/an.**

L'ensemble de cette étude a vocation à être approfondi afin que la base de données ROE puisse être complétée, affinée et que, département par département, le potentiel théorique soit confirmé par des expertises, notamment de terrain. La FFAM a cette ambition pour que l'électricité de demain soit davantage issue de nos moulins.

L'INTÉGRATION DE LA TRÈS PETITE HYDRO-ÉLECTRICITÉ DANS LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EST UN CHOIX D'AVENIR : LES MOULINS NE SONT PAS SEULEMENT UN MAGNIFIQUE HÉRITAGE DU MILLÉNAIRE PASSÉ, ILS SONT ÉGALEMENT UN ATOUT POUR UNE ÉNERGIE PROPRE SUR DES RIVIÈRES VIVANTES ET DANS DES TERRITOIRES DYNAMIQUES.

POTENTIEL HYDROÉLECTRIQUE

EN MW DE NOS MOULINS*



POUR UNE PUISSANCE TOTALE DE

802 MW

*selon résultat préliminaire **Eau'Rigine**

- 1.** <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148118312898>
- 2.** https://www.france-hydro-electricite.fr/wpcontent/uploads/2019/08/Restoration_Handbook_Final-FHE.pdf
- 3.** Direction Générale de l'Énergie et du Climat (DGEC), la Direction de l'Eau et de la Biodiversité (DEB), les Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) et les producteurs (fédérés autour de l'Union Française de l'Électricité (UFE)),
- 4.** Politique des agence de l'eau, destruction des seuils pourquoi ?
 Les Agences de l'eau et la restauration : 50 ans de tensions entre hydraulique et écologique
<https://journals.openedition.org/vertigo/17194#tocto1n4>
- 5.** https://www.energethique.com/file/ARCEA/Presentations/Conference_GAE-NA_2016_12_01/Conference_GAENA_2016_12_01_e_Theme_3.pdf
 Dans une présentation lors du CISP 2016 portant sur «Quelles énergies pour les générations futures : les défis à relever », Gilbert BRUHL propose les valeurs d'émission de CO2 présentées dans la Figure 8.
- 6.** SRREN Report 2012 <http://www.ipcc-wg3.de/srren-report/>
- 7.** Source fhe
- 8.** Courret et Larinier, Onema 2008
- 9.** Lien d'accès aux données depuis le portail du Service d'administration nationale des données et référentiels : <https://www.sandre.eaufrance.fr/atlas/srv/fre/catalog.search;jsessionid=node08ev5d39bjv9a43tpg0agpvxq312272.node0#/metadata/59057026-b40c-4cf9-9e3e-7296e0aa1a78>
- 10.** <https://cartograph.eaufrance.fr/donnees/1234596/2020>
- 11.** Suivant leurs caractéristiques, les données mesurées (Hauteur/Débit) par ces équipements sont accessibles sur les sites internet:
 # banque Hydro (<http://www.hydro.eaufrance.fr/>)
 # Vigicrues (<http://www.vigicrues.gouv.fr/>)
 # observatoire national des étiages (<http://onde.eaufrance.fr/>)
<https://www.sandre.eaufrance.fr/atlas/srv/fre/catalog.search#/metadata/bced3463-ea57-45b0-96a3-d3c10d381eab>
<https://www.sandre.eaufrance.fr/atlas/srv/fre/catalog.search#/metadata/13f9ce88-7764-494e-ae8f-2d737b5eaaf8>
- 12.** <https://www.turbiwatt.com/>
- 13.** <https://www.cre.fr/Documents/Publications/Rapports-thematiques/couts-et-rentabilites-de-la-petite-hydroelectricite-en-metropole-continentale>