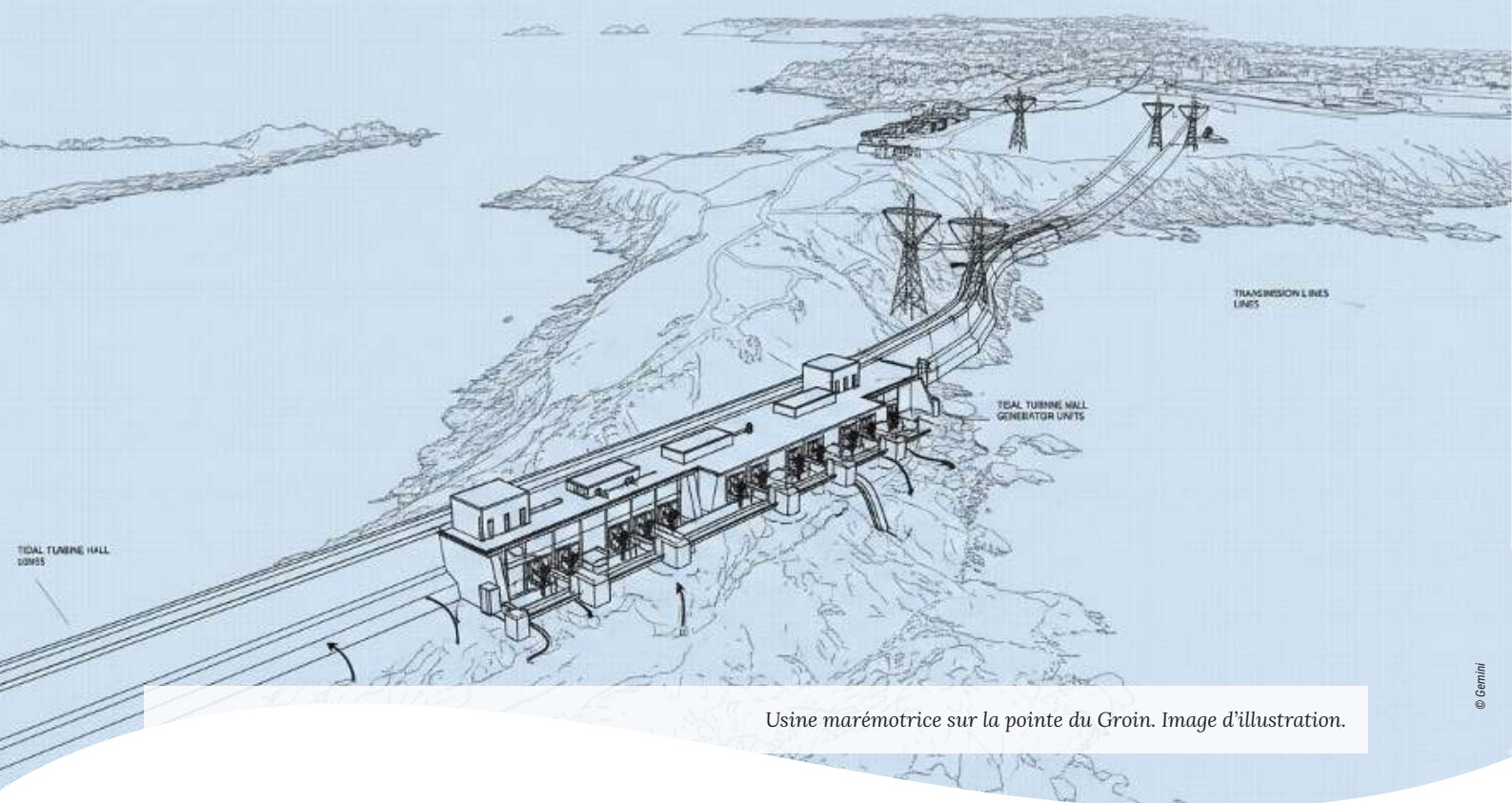




Usine marémotrice sur la pointe du Groin. Image d'illustration.

© Gemini

L'usine marémotrice du Mont-Saint-Michel: le projet hors-normes d'Albert Caquot

Marc Mauduit

Conçu dans les années 1960 par l'ingénieur visionnaire Albert Caquot, le projet de barrage marémoteur de la baie du Mont-Saint-Michel figure parmi les plus grands rêves énergétiques du XX^e siècle. Exploitant des marées d'une amplitude exceptionnelle (jusqu'à 12 à 14 m de marnage), cette installation titanesque visait une puissance installée évaluée entre 10 et 18 GW – soit l'équivalent d'une douzaine de réacteurs nucléaires – pour fournir à la France une électricité renouvelable massive et renforcer son indépendance énergétique. Malgré des études poussées et le succès de son aînée de la Rance, ce projet hors normes ne vit jamais le jour, abandonné à la fin des années 1970 sur fond de choix nucléaires et de préoccupations environnementales.

L'idée d'exploiter les marées du Mont-Saint-Michel émerge dès la Seconde Guerre mondiale, alors que le rationnement d'énergie pousse à imaginer de nouvelles sources. Un premier projet est esquissé en 1942 dans la baie du Cotentin, suivi de plusieurs variantes après-guerre. La configuration géographique entre la Bretagne et le Cotentin, où une vaste zone côtière peu profonde subit des marées record (12-14 m aux

équinoxes), offrait un potentiel unique au monde. Dans les années 1950, EDF mène de nombreuses études et aboutit en 1958 à un avant-projet ambitieux: un bassin de retenue d'environ 900 km² fermé par 35 km de digues, pour une puissance installée estimée à 10 000 MW – soit quarante fois celle de l'usine marémotrice de la Rance. Le coût d'investissement prévu est colossal (40 milliards de francs 1974 selon EDF)

et d'importantes études de site (marées, courants, sédiments) sont réalisées, pour un montant d'environ 80 millions de francs.

En parallèle, la France réalise concrètement le potentiel de l'énergie des marées avec l'usine marémotrice de la Rance en Bretagne. Construite entre 1961 et 1966 sur l'estuaire étroit de la Rance, cette centrale de 240 MW (24 turbines de 10 MW) démontre la faisabilité technique

et économique de la «houille bleue». Le général de Gaulle inaugure le barrage de la Rance en novembre 1966 en saluant une prouesse industrielle française. Fort de ce succès, le projet bien plus vaste du Mont-Saint-Michel reste sur la table chez EDF... mais il va rapidement perdre son élan.

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES D'UN PROJET TITANESQUE

Le projet du Mont-Saint-Michel se distinguait par des dimensions hors normes, sans commune mesure avec celles de l'usine de la Rance ou de toute autre centrale marémotrice existante à l'époque. Son principe général consistait à barrer la baie du Mont-Saint-Michel pour créer de vastes réservoirs d'eau de mer, afin d'exploiter en continu le différentiel de niveau provoqué par les marées. Albert Caquot reprit les études antérieures d'EDF en les étoffant d'innovations majeures : au lieu d'un seul bassin, il proposa deux bassins en cascade (haut et bas) permettant une production d'électricité quasi-permanente sur le cycle des marées. Cette configuration complexe impliquait un gigantesque système de digues en mer, d'installations hydroélectriques et même l'intégration d'une centrale nucléaire de soutien. Parmi les paramètres clés du schéma final figuraient :

- Puissance installée envisagée : environ 12 000 MW, soit environ 50 fois la puissance de la Rance. C'est un ordre de grandeur inédit, proche de la consommation électrique totale de la France des années 1970 selon Caquot.
- Nombre de turbines : près de 800 groupes bulbes Kaplan (turbines à hélices à pales orientables), d'une puissance unitaire d'environ 40 MW. Ces turbines dites «réversibles» peuvent générer du courant lors de la vidange comme du remplissage des bassins, et même fonctionner en pompes pour remonter l'eau d'un bassin à l'autre en période creuse.
- Infrastructure de barrage : plus de 100 km de digues au total, dont une digue extérieure d'environ 55 km de long en baie (suivant à peu près l'ancienne ligne côtière médiévale), fermant l'ensemble du golfe normano-breton, et une digue intérieure est-ouest d'environ 21 km

séparant les deux bassins.

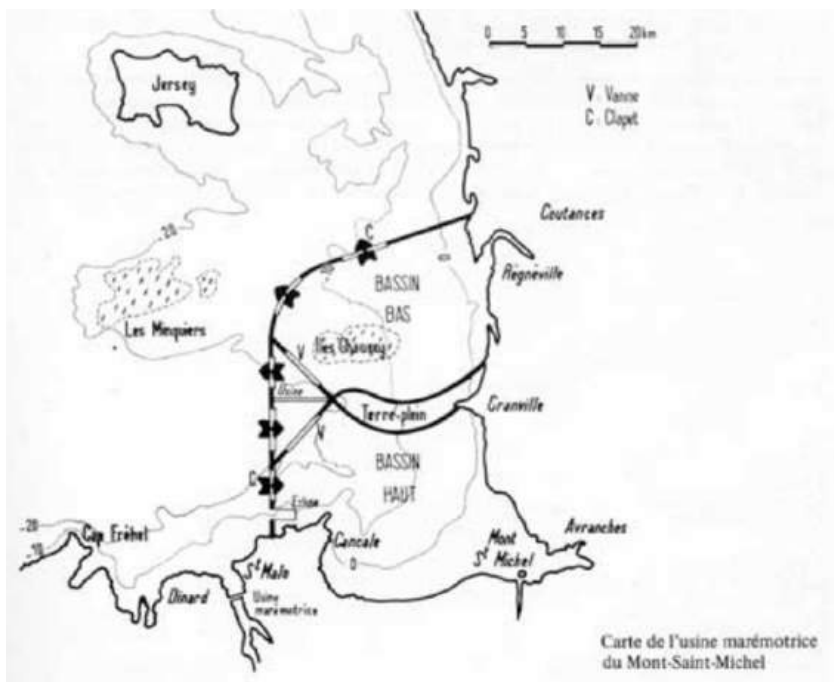
- Superficie des bassins : 600 à 900 km² d'aire marine retenue, divisée en un bassin Sud (dit haut) et un bassin Nord (dit bas) de taille sensiblement égale. Le bassin Sud, attenant à l'embouchure du fleuve Couesnon, aurait un niveau d'eau moyen toujours supérieur de plusieurs mètres à celui du bassin Nord, créant une dénivellation exploitable en continu.
- Hydraulique des marées : amplitude naturelle de 12 à 14 m de hauteur d'eau entre marée basse et marée haute dans la baie, offrant un gisement énergétique exceptionnel concentré sur ce site. Des écluses et vannes géantes à flot et à jusant étaient prévues pour contrôler les échanges d'eau entre l'océan et les bassins, et réguler ainsi le remplissage/vidange de chacun.

Le fonctionnement prévu reposait sur un cycle à deux bassins décalés. À marée montante, l'eau de la Manche serait d'abord canalisée vers le bassin Sud (haut) à travers des vannes, tandis que le bassin Nord (bas) resterait relativement vide. Puis, à marée descendante, les vannes se ferment : l'eau stockée dans le bassin haut est turbinée vers le bassin bas à travers les centaines de groupes bulbes installés dans la digue intérieure, produisant de l'électricité en continu tant que le gradient de niveau subsiste entre les deux réservoirs. Une fois la mer redescendue en-dessous du niveau du

bassin bas, les vannes du large s'ouvrent pour évacuer ce dernier à marée basse. Le cycle peut alors recommencer lors de la marée montante suivante. Ce schéma à double bassin permet, en théorie, une production quasi-continue (y compris autour de l'étalement), là où une centrale marémotrice classique à un seul bassin connaît des périodes d'arrêt entre remplissage et vidange.

« Le projet comporte la construction de deux bassins toujours dénivelés par rapport au niveau moyen des marées, Sud toujours plus haut, Nord toujours plus bas. Le lac Sud constituerait un vaste port en eau profonde et rendrait au Mont-Saint-Michel son caractère insulaire » expliquaient dès 1954 les ingénieurs P. Simonet et H. Jacquinet en décrivant ce concept novateur.

En effet, le bassin Sud, le plus proche du Mont, aurait fait office de retenue permanente et de port en eau profonde pour la région. Le bassin Nord englobant les îles Chausey aurait servi de retenue basse. Une grande plateforme artificielle était prévue à la jonction des digues près de la côte normande (au nord de Granville) pour accueillir un complexe nucléaire et des installations industrielles. Ce terre-plein aurait fourni d'une part une assise solide aux ouvrages et, d'autre part, un site pour implanter plusieurs réacteurs nucléaires auxiliaires. L'idée fondamentale d'Albert Caquot était en effet de coupler l'usine marémotrice avec des centrales nucléaires à refroidir : l'eau des bassins aurait servi





Usine marémotrice de la Rance

de source froide aux condensateurs, et en retour les réacteurs auraient apporté une énergie de pompage bon marché la nuit pour remonter l'eau du bassin bas vers le bassin haut. Ce modèle préfigure en quelque sorte les centrales de pompage-turbinage (STEP) actuelles, en combinant énergie marine et nucléaire afin d'optimiser la production selon la demande. Caquot voyait également dans

cette synergie un moyen d'adapter parfaitement l'offre à la consommation : production garantie par le nucléaire en base, surcroît d'énergie marémotrice en heures de pointe grâce au pompage anticipé pendant les heures creuses. Sur le plan génie civil, l'ouvrage s'annonçait hors normes. La digue principale de 55 km en plein océan aurait été construite en enrochements et caissons,

profitant éventuellement de hauts-fonds et de l'alignement d'îles pour optimiser le tracé. L'expérience acquise sur la Rance laissait envisager des techniques de coferdams et de bateaux-casiers flottants pour fermer progressivement la baie. Des centaines d'alternateurs bulbes de 40 MW chacun devaient être intégrés aux digues, formant la plus grande usine marémotrice jamais imaginée. À pleine puissance, les 18 000 MW théoriques du complexe à deux bassins (chiffre avancé dans la version finale de Caquot) auraient égalé la puissance de six sites nucléaires d'un gigawatt. Albert Caquot insistait sur les économies d'échelle : en reproduisant en série des centaines de fois les mêmes modules (turbines, alternateurs, caissons...), il estimait que le coût unitaire diminuerait fortement selon ses lois empiriques de dégressivité. Il chiffrait le coût total de son projet à environ 18 milliards de francs (valeur 1976), soit bien moins que les 40 milliards estimés par EDF pour un projet pourtant plus petit en 1958. Cette évaluation optimiste était toutefois accueillie avec

ALBERT CAQUOT, LE DÉFENSEUR ACHARNÉ DU PROJET

Le destin de l'usine marémotrice du Mont-Saint-Michel est indissociable de la personnalité et de l'engagement d'Albert Caquot. Considéré comme l'un des plus brillants ingénieurs français du XX^e siècle, Caquot s'est illustré dans des domaines variés (structure des avions pendant la Première Guerre mondiale, calcul de ponts suspendus, fondations en béton armé, dirigeables, etc.) et a présidé de nombreuses instances techniques. Il s'est toujours intéressé à l'énergie des marées : membre de l'Académie des Sciences, il suivait dès les années 1920 les expérimentations de Georges Claude sur l'énergie des océans. Dans les années 1960, il apporte son expertise au projet de la Rance en concevant la méthode des caissons flottants pour le barrage, comme évoqué plus haut. Mais c'est surtout dans la dernière partie de sa vie qu'il va se muer en ardent promoteur de la marémotrice du Mont-Saint-Michel.

À plus de 90 ans, alors que beaucoup auraient renoncé, Caquot va consacrer ses cinq dernières années (1972-1976) quasi exclusivement à ce projet, qu'il qualifie lui-même de « grandiose ». Voyant dans la « force unique » de l'océan un ultime recours pour la France, il y perçoit « une contribution majeure à l'indépendance énergétique de la France ». Ce patriote, marqué par les pénuries d'énergie de la guerre, est obsédé par l'idée de libérer le pays du joug des énergies importées : il veut utiliser le « revenu » régulier des marées plutôt que de puiser sans compter dans le « capital » fini des combustibles fossiles. D'une plume prolifique, il rédige mémoires et conférences sur le sujet, multipliant les calculs, les plans, les schémas de fonctionnement détaillés. Seul et sans appui officiel, il affine le concept du double bassin, en démontre la faisabilité

technique et économique selon lui, et va jusqu'à défendre son projet devant diverses académies et comités. Ses pairs saluent son enthousiasme et son inventivité – les Académies de Marine et des Sciences adopteront même en 1981 des vœux pour réétudier la question marémotrice géante – mais les décideurs restent sourds. Albert Caquot apparaît alors comme un visionnaire incompris, en décalage avec les priorités de son époque. « *Qu'un nonagénaire puisse, seul, sans collaborateurs et sans encouragements, concevoir, calculer et défendre une œuvre de cette ampleur, voilà qui force l'admiration* » écrira plus tard un de ses confrères. Effectivement, son acharnement force le respect : jusqu'à son dernier souffle (il s'éteint fin 1976), Caquot a cru en la marée du Mont-Saint-Michel. Il a d'ailleurs su anticiper certaines problématiques modernes : la combinaison du renouvelable et du nucléaire pour lisser la production, la protection du Mont contre l'ensablement, ou encore l'argument de l'énergie propre face aux nuisances de l'industrie fossile. Autant d'idées en avance sur leur temps, portées par un esprit libre de toute pression politico-financière. Pour autant, on peut estimer rétrospectivement qu'il a peut-être sous-estimé l'ampleur des contraintes – notamment environnementales – qu'un tel projet engendrerait inévitablement. L'histoire donnera raison en partie à ses mises en garde (la France aura bien des difficultés d'approvisionnement en hydrocarbures dans les années 1970, et aujourd'hui encore la question de l'indépendance énergétique est cruciale), mais elle confirmera aussi la validité de certaines réserves (les très grandes marémotrices restent quasi inexistantes dans le monde, signe de défis persistants).



Construction du barrage de la Rance. Vu du chantier asséché durant la construction du barrage.

scepticisme: en comparaison, l'usine de la Rance (bien que construite dans des conditions difficiles, fondée sur rocher en site abrité) avait coûté environ 0,8 milliard de francs. Quoi qu'il en soit, Caquot était persuadé de tenir un chantier du siècle aux retombées immenses. «J'offre en plus un site pour un complexe nucléaire, un port en eau profonde, le développement industriel de toute une région et l'épargne pour notre balance commerciale de l'achat d'une dizaine de millions de tonnes de fuel», déclarait-il pour défendre son projet. Le message est clair: au-delà de l'électricité verte, cette méga-structure aurait transformé l'économie locale et réduit la dépendance nationale aux hydrocarbures importés.

UN PROJET DÉMESURÉ PAR RAPPORT À L'USINE MARÉMOTRICE DE LA RANCE

Une comparaison avec l'usine marémotrice de la Rance (Ille-et-Vilaine), mise en service en 1966, permet de mesurer l'ampleur démesurée du projet du Mont-Saint-Michel. La Rance dispose d'une digue-barrage de 750 m de long fermant un estuaire relativement exigu, avec 24 turbines Kaplan réversibles totalisant 240 MW de puissance installée et produisant environ 500 GWh par an. Elle était jusqu'en 2011 la plus grande centrale marémotrice au monde, avant d'être légèrement dépassée par l'usine sud-coréenne de Sihwa (254 MW). En comparaison, le barrage du Mont-Saint-Michel aurait ceinturé la quasi-totalité de la baie sur plus de 50 km, pour produire environ 40 fois l'équivalent de

l'usine de la Rance. Autrement dit, un seul cycle de marée dans la baie normande aurait pu générer autant d'électricité que toutes les marées d'un mois dans l'estuaire breton.

Cette ambition sans précédent laissait entrevoir des défis techniques considérables. Alors que la Rance avait bénéficié d'un site naturellement favorable (rivière resserrée, fonds rocheux solides, accès routier facile) et d'un financement d'État dans le contexte des Trente Glorieuses, le projet du Mont-Saint-Michel impliquait de construire en pleine mer des digues plusieurs dizaines de fois plus longues, sur des sols sédimentaires, et de gérer un volume d'eau infiniment supérieur. En outre, le pari environnemental n'était pas le même: l'estuaire de la Rance, peu profond et déjà partiellement aménagé, a pu être endigué en limitant les dégâts écologiques, alors que la baie du Mont-Saint-Michel aurait subi des transformations drastiques de son écosystème et de son paysage littoral. La complexité du montage industriel (intégrant du nucléaire, un port maritime, etc.) ajoutait encore à la gageure. Il est à noter qu'Albert Caquot lui-même avait contribué au succès de la Rance, ce qui nourrissait sa conviction de pouvoir passer à l'échelle supérieure. C'est lui qui proposa la méthode des caissons béton immergés pour réaliser l'enceinte provisoire de chantier à la Rance, solution qui permit de maîtriser les violents courants pendant la construction et qui est devenue un standard de l'ingénierie maritime. Néanmoins, la marche était extrêmement haute: aucun ouvrage hydroélectrique de cette taille n'a jamais été entrepris à ce jour. Le simple fait

que la Rance soit restée pendant 45 ans la plus puissante centrale marémotrice au monde (avec 240 MW seulement) témoigne de l'exception que représentait le projet de la baie du Mont-Saint-Michel sur la scène internationale. En 1975, EDF le qualifia d'ailleurs de «tellement énorme, incertain et coûteux» qu'il ne serait pas raisonnable d'y donner suite «sans parler du bouleversement écologique» qu'il entraînerait.

LES RAISONS DE L'ABANDON: COÛTS, NUCLÉAIRE ET ÉCOLOGIE

Plusieurs facteurs déterminants ont conduit à l'abandon du projet marémoteur du Mont-Saint-Michel, malgré ses atouts stratégiques évidents. En premier lieu, le contexte économique et énergétique des années 1960-1970 n'a pas joué en sa faveur. Au milieu des années 1960, le pétrole bon marché abondait sur le marché international, tirant vers le bas le coût du kWh thermique. L'énorme chantier du Mont-Saint-Michel, avec ses dizaines de milliards de francs d'investissement et ses délais longs, apparaissait difficile à justifier face à des centrales fuel classiques rapides à construire. EDF a ainsi suspendu le projet en 1966 précisément à cause de cette baisse du prix des combustibles fossiles qui rendait l'opération non rentable à court terme. Quelques années plus tard, lorsque le choc pétrolier inverse la donne en 1973, la France a déjà fait le choix d'une autre voie: le gouvernement opte en 1974 pour un programme massif de centrales nucléaires (le «tout-électro-nucléaire» du Plan Messmer) afin d'assurer l'indépendance énergétique nationale.

Dans ce contexte, relancer un méga-projet marémoteur ne suscite guère d'enthousiasme institutionnel: l'énergie des marées est perçue comme trop aléatoire et marginale à l'échelle du pays, comparée aux promesses du nucléaire centralisé. De surcroît, le coût estimé du barrage du Mont-Saint-Michel n'a cessé d'augmenter au fil des études. Les dirigeants d'EDF redoutent un gouffre financier et technique, d'autant que le retour d'expérience de la Rance – pourtant positive – montre des frais de maintenance non négligeables (gestion de l'envasement, corrosions, etc.). L'argument économique est donc déterminant: «un projet tellement énorme, incertain et coûteux [...] qu'en l'état actuel nous ne

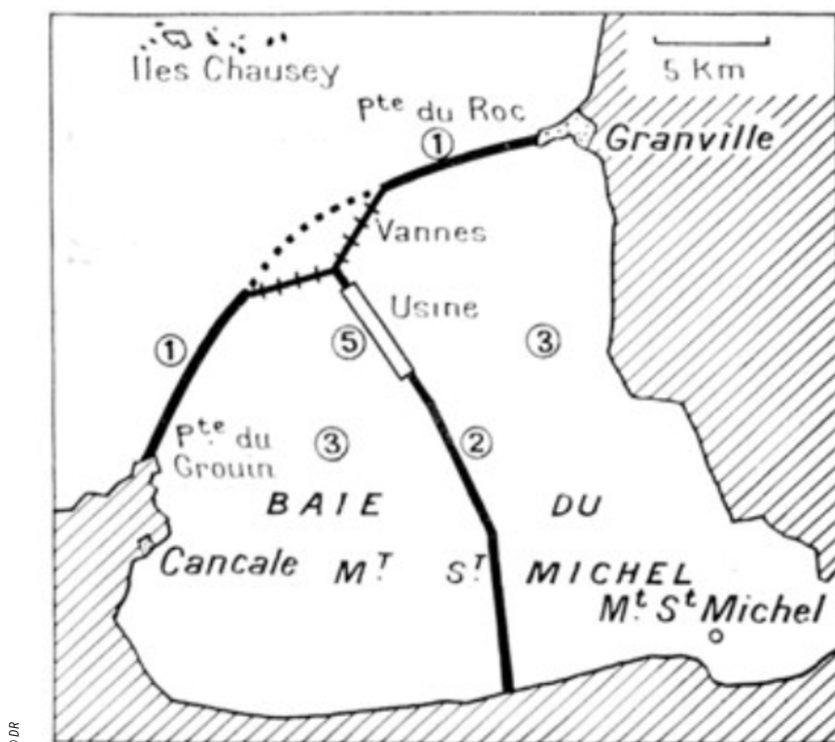


Schéma du projet par les ingénieurs P. Simonet et H. Jacquinet

prendrions pas l'initiative de promouvoir une telle installation», déclare, en 1975, un porte-parole d'EDF à propos de la marémotrice du Mont-Saint-Michel. Un autre frein majeur tient à l'impact environnemental et patrimonial d'un tel ouvrage. La baie du Mont-Saint-Michel est un site naturel et historique d'exception, dont l'équilibre écologique est très sensible. Les études menées dans les années 1960-1970, notamment par le Laboratoire d'hydraulique de Grenoble (LEGI) ont mis en garde contre les risques de bouleversement de l'écosystème marin et littoral : modification des courants, piégeage des sédiments, ensablement accéléré de certains secteurs et assèchement d'autres, perturbation de la faune et de la flore estuariennes, etc. L'ouvrage aurait inévitablement transformé le paysage en faisant reculer la mer de plusieurs kilomètres à certains endroits et en altérant la morphologie de la côte.

Certes, Albert Caquot arguait que les « perturbations » engendrées devaient être comparées à celles d'autres sources d'énergie – pollution de l'air par les centrales thermiques, nécessité de construire de nombreuses centrales nucléaires sur les fleuves, etc. – et il promettait de restaurer le caractère insulaire du Mont en le ceinturant d'eau en permanence. Néanmoins, pour les décideurs de l'époque, le jeu n'en valait pas la chandelle. En 1976, le verdict

tombe : EDF et les pouvoirs publics ferment définitivement la porte à l'usine marémotrice du Mont-Saint-Michel, en dépit du lobbying passionné de Caquot et de quelques partisans. Le projet rejoint le sort d'autres grands desseins jugés trop coûteux ou trop risqués.

UN RÊVE BLEU ENTRE AUDACE ET RÉALISME

L'usine marémotrice du Mont-Saint-Michel demeure l'un des grands projets avortés de l'histoire industrielle française, à la frontière de l'utopie technologique et de la prospective éclairée. Techniquement, rien n'indique qu'elle était irréalisable : les études ont montré qu'on savait construire de tels ouvrages, et la Rance en a fourni un prototype à échelle réduite. Énergétiquement, son apport aurait été majeur, voire structurant, dans le mix français. Mais la démesure du projet, son coût prohibitif, les incertitudes écologiques et un contexte géopolitique défavorable ont scellé son destin. Ce cas d'école illustre combien la réalisation d'une vision d'ingénieur dépend de facteurs extra-techniques : ici les choix stratégiques nationaux (nucléaire vs. renouvelable), l'acceptabilité environnementale et la capacité financière ont eu raison de l'ambition initiale. Avec le recul, que reste-t-il de ce rêve inabouti ? D'abord une source

d'inspiration. À l'heure où la transition énergétique et la lutte contre le changement climatique incitent à repenser notre production d'électricité, la vision de Caquot – exploiter une ressource naturelle inépuisable pour garantir l'indépendance énergétique – trouve un écho particulier. La force des marées est une énergie 100 % renouvelable, prédictible et propre : autant d'atouts qui redeviennent attractifs face aux aléas des énergies fossiles. Cependant, les écueils qui existaient dans les années 1970 demeurent en grande partie aujourd'hui. Les projets marémoteurs de grande envergure affrontent toujours des défis économiques et écologiques redoutables, si bien qu'aucune réalisation n'a approché l'échelle du projet Caquot un demi-siècle plus tard. Pour preuve, la centrale de Sihwa en Corée du Sud, mise en service en 2011, détient le record mondial avec 254 MW installés – un chiffre sans commune mesure avec les 10-12 GW envisagés au Mont-Saint-Michel. La filière marémotrice s'oriente davantage vers des solutions localisées (hydroliennes sous-marines, petits barrages d'estuaires), moins risquées et moins coûteuses, que vers des barrages titanesques en baie ouverte. Par ailleurs, la baie du Mont-Saint-Michel a finalement retrouvé son caractère maritime d'une manière bien différente. Un barrage beaucoup plus modeste a été édifié sur le Couesnon en 2009, non pas pour produire de l'électricité, mais pour réguler le flux des eaux douces et chasser les sédiments de la baie. Cet aménagement hydraulique, combiné à d'autres travaux, a permis de repousser l'ensablement et de resouigner l'insularité du Mont, atteignant ainsi l'un des objectifs que Caquot avait assignés à son grand barrage... sans les inconvénients majeurs qu'il comportait. Le défi marémoteur du Mont-Saint-Michel, lui, reste dans les archives comme un témoin fascinant de l'ingéniosité et de l'audace d'une époque. Son histoire offre de précieuses leçons sur la nécessité de concilier ambition technologique, viabilité économique et respect de l'environnement dans les grands projets d'énergie. Si l'océan est une promesse de puissance, il rappelle aussi que tout « rêve bleu » doit composer avec la réalité du terrain et la sagesse du développement durable. ●