

Guide technique

Les pompes à chaleur sur eau de mer

Manuel pour la conception et la mise en œuvre d'installation

Thalasso thermique

La filière pompe à chaleur sur eau de mer nécessite que les installations soient conçues, réalisées et entretenues dans les règles de l'art par des professionnels compétents tant dans les domaines des installations maritimes, que des systèmes de production et de distribution.

Ce guide a pour objet de rappeler les grands principes de mise en œuvre de ces installations.

1	CONTEXTE ET OBJECTIFS DU GUIDE.....	5
1.1	Contexte.....	5
1.2	Objectifs du guide	5
2	GENERALITES DES INSTALLATIONS DE PRODUCTION THERMIQUE METTANT EN ŒUVRE DES PAC.....	6
2.1	Principes généraux de fonctionnement des PAC & fluides frigorigènes	6
2.1.1	Diversité des machines.....	7
2.1.2	Sélection des machines	7
2.2	Budget installation de production	8
2.3	Part d'Énergie renouvelable à prendre en compte	9
2.4	Impact des températures.....	9
2.4.1	Températures de consignes	9
2.4.2	Delta T	9
2.4.3	Caractérisation des performances	10
2.4.4	Performances réelles.....	10
2.5	Utilisation de l'énergie thermique produite	10
2.5.1	Détermination des besoins	10
2.5.2	Chauffage de bâtiments – Les différents émetteurs	10
2.5.2.1	Planchers chauffants	11
2.5.2.2	Plafonds rafraîchissants hydrauliques	11
2.5.2.3	Radiateurs à eau	11
2.5.2.4	Émetteurs à air	11
2.5.3	Production d'ECS (Eau Chaude Sanitaire).....	11
2.5.4	Rafraîchissement des bâtiments	12
2.5.5	Modes de régulation	12
2.5.6	Taux de couverture et simultanéité des besoins.....	12
2.6	Différentes typologies d'installations.....	13
2.6.1	Principe	13
2.6.2	Installation de production centralisée	13
2.6.2.1	Installation centralisée alimentée directement en eau de mer.....	13
2.6.2.2	Installation centralisée avec boucle intermédiaire en eau industrielle	14
2.6.3	Installation multi productions	14
2.6.3.1	Installation avec boucle d'eau tempérée	14
2.6.3.2	Installation avec boucle tempérée en eau industrielle.....	15
2.6.3.3	Installation avec boucle tempérée en eau de mer	16
2.6.3.4	Installation centralisée et multi-productions (avec boucle intermédiaire)	16
3	GESTION D'UN PROJET DE PAC SUR EAU DE MER	16
3.1	Principe d'une PAC sur eau de mer.....	16
3.2	Méthodologie de ciblage de projet PAC-EM	18
3.3	Captage et rejet en mer	18
3.3.1	Etudes préalables de la zone d'implantation	18
3.3.1.1	Relevés bathymétriques et topographiques.....	18
3.3.1.2	Relevés morphologiques des fonds	19
3.3.1.3	Reconnaissance sismique	19
3.3.1.4	Détermination de la nature et des caractéristiques dimensionnelles des sols.....	19
3.3.1.5	Détermination des caractéristiques mécaniques des sols.....	19
3.3.1.6	Reconnaissance et caractérisation des écosystèmes marins.....	20

3.3.1.7	Budget des études préalables.....	21
3.3.1.8	Planning des études préalables	23
3.3.2	Conception des ouvrages maritimes	24
3.3.2.1	Implantation des captages et rejets d'eau de mer	24
3.3.2.2	Le captage d'eau de mer	24
3.3.2.3	Rejet d'eau de mer	27
3.3.2.4	Canalisations sous-marines	27
3.3.2.5	Budget ouvrages maritimes.....	28
3.4	Conception des équipements dans le local eau de mer.....	28
3.4.1	Pompes eau de mer	28
3.4.1.1	Pompes immergées	28
3.4.1.2	Pompes en local séparé.....	28
3.4.2	Filtration.....	28
3.4.3	Echangeurs eau de mer/eau douce.....	29
3.4.4	Budgets investissement équipements eau de mer	30
4	IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES PAC SUR EAU DE MER	30
4.1	Généralités.....	30
4.1.1	Etude d'impact d'une PAC sur eau de mer.....	30
4.1.2	Etude de suivi d'impact d'une PAC sur eau de mer.....	31
4.1.3	Budget Etude d'impact d'une PAC sur eau de mer	31
4.1.4	Planning Etude d'impact d'une PAC sur eau de mer.....	32
4.1.5	Grille d'analyse des impacts environnementaux des PAC sur eau de mer.....	32
5	INTERFACES ET CONTRAINTES REGLEMENTAIRES ET ADMINISTRATIVES.....	32
5.1	Rôles et Compétences des différents acteurs.....	32
5.1.1	Les services instructeurs de l'Etat	32
5.1.2	Bureau d'étude milieu maritime (conception des ouvrages)	33
5.1.3	Société de travaux maritimes.....	33
5.1.4	Bureau d'études thermiques.....	33
5.1.5	Société de maintenance en milieu maritime.....	33
5.2	Textes réglementaires.....	33
5.2.1	Prélèvement et Rejet en mer	33
5.2.2	Eau chaude sanitaire	33
5.2.3	Installation avec fluides frigorigènes.....	33
5.2.4	Budgets dossiers réglementaires	34
5.2.5	Planning dossiers réglementaires.....	34
6	Analyse et description des retours d'expériences	34
6.1	Facteurs clés de la réussite d'un projet.....	34
6.1.1	Typologies des projets.....	34
6.1.2	Coût d'investissements	35
6.1.3	Coût de maintenance	35
6.1.4	Coût global	36
6.2	Retour d'expérience : production Réseau de chaleur Scandinave.....	36
6.2.1	Description succincte	36
6.2.2	Investissement	37
6.2.3	Maintenance	37
6.3	Retour d'expérience : Forum Grimaldi Monte Carlo - Monaco	38

6.3.1	Description succincte	38
6.3.1	Détails	38
6.3.2	Investissement	38
6.3.3	Maintenance	38
6.3.4	Coût global	39
6.4	Retour d'expérience : La Divette à Cherbourg	40
6.4.1	Description succincte	40
6.4.2	Détails	40
6.4.3	Investissement	40
6.4.4	Maintenance	40
6.4.5	Coût global	40
6.5	Retour d'expérience : Leucate	41
6.5.1	Description succincte	41
6.5.2	Détails	41
6.5.3	Investissement	41
6.5.4	Maintenance	42
6.5.5	Gain environnemental.....	42
7	SYNOPTIQUE DE REALISATION D'UN PROJET DE PAC SUR EAU DE MER	42
7.1	Montages juridiques et contractuels	42
7.2	Financements, aides.....	42
7.2.1	Les aides générales mobilisables pour développer la thalasso thermie.....	42
7.2.2	Aides du Fonds Chaleur.....	42
7.2.3	Eligibilité TVA à taux réduit pour vente de chaleur sur un réseau	43
7.2.4	Eligibilité aux CEE	43
7.3	Planning type et étapes clés d'un projet.....	43
	Liste indicative d'installations existantes	44
	France.....	44
	Monaco.....	44
	International.....	44
	États-Unis.....	44
	Norvège	44
	Suède	44
	Pays bas	44
	Liste indicative des fournisseurs de pompe à chaleur	45
	Machines industrielles.....	45
	Autres machines	45
	Liste indicative de bureau d'études spécialisés.....	46
	Liens internet utiles	47
	Glossaire	48
	Bibliographie	50

1 CONTEXTE ET OBJECTIFS DU GUIDE

1.1 Contexte

La transition énergétique impose de diminuer les consommations d'énergies, le taux de rénovation et de construction de bâtiment reste faible. Ainsi, si de nombreuses économies sont accessibles, il subsistera encore très longtemps des besoins en énergie thermique qu'il faudra satisfaire pour répondre aux exigences de confort.

Les systèmes thermodynamiques, groupes de production d'eau glacée, thermo-frigo-pompes ou pompes à chaleur (PAC) sont des moyens de production thermique qui permettent de valoriser les énergies renouvelables et de récupération pour fournir les utilités thermiques non industrielles telles que le chauffage, l'eau chaude sanitaire ou le rafraîchissement de locaux. Ce sont des solutions efficaces de production à faible coût écologique (réduction de la production de CO2 de 60 à 70% comparé à des solutions gaz condensation) possédant des rendements énergétiques compétitifs face aux fluctuations économiques des énergies fossiles.

Les mers et les océans représentent un réservoir énergétique naturel qui peut assurer une partie des besoins énergétiques des franges littorales qui se densifient.

Un projet de PAC sur eau de mer doit mettre en corrélation les demandes en énergie thermique d'un système, généralement une zone d'habitation ou une zone d'activité avec la disponibilité des énergies thermiques marines. L'énergie est valorisée à travers des systèmes thermodynamiques dont les performances sont conditionnées par de nombreux paramètres. Le transport d'énergie se fait à travers des boucles de canalisations qui représentent une part sensible des budgets de réalisation.

Tous ces aspects nécessitent d'appréhender des notions de proximité et d'adéquation des températures des différents systèmes. Les couplages des systèmes thermodynamiques avec les réserves d'énergie thermique des mers sont des installations complexes à étudier, réaliser et exploiter qui nécessitent des compétences particulières. Ces opérations doivent être mises en œuvre en connaissance de cause afin de garantir les performances technico-économiques des projets sur leur durée de vie mais aussi maîtriser leurs impacts environnementaux directs et indirects.

1.2 Objectifs du guide

Ce document a pour ambition de présenter l'ensemble des éléments à connaître avant d'initier une démarche visant à développer ou réaliser une opération mettant en œuvre des pompes à chaleur sur eau de mer.

Les pompes à chaleur sur eau de mer associent deux secteurs d'activité très éloignés l'un de l'autre. D'une part, la ressource maritime et sa biodiversité, avec une température subie, plus ou moins variable, et d'autre part des bâtiments dont les besoins énergétiques sont très variables et peu adaptables.

L'objectif de ce guide est de fournir aux maîtres d'ouvrage publics ou privés, à leurs conseils, bureaux d'études, aux exploitants d'installations et en général à tous les acteurs pouvant être impliqués dans d'un projet de type PAC (Pompes A Chaleur) sur eau de mer (PAC-EM) tous les éléments indispensables à la conception d'un projet efficace.

Ce guide donne des éléments de comparaison entre diverses solutions. Il met en garde vis-à-vis des différents aléas et risques associés à ce type de projet et met en avant les solutions éprouvées ou d'avenir :

- Principe des PAC-EM et domaines d'application,
- Descriptif des installations et coûts d'investissement,
- Comparatif en coût global avec des solutions standard,
- Impacts des PAC-EM et démarches administratives,
- Déroulement d'un projet,

Ce guide s'appuie notamment :

- Sur le retour d'expérience réalisée sur diverses installations
- Sur la consultation de divers interlocuteurs pour les aspects techniques du captage en mer, réglementaires et administratifs
- Sur le contenu des autres guides ADEME existants sur les PAC géothermiques sur champ de sondes et aquifères superficiels

2 GENERALITES DES INSTALLATIONS DE PRODUCTION THERMIQUE METTANT EN ŒUVRE DES PAC

2.1 Principes généraux de fonctionnement des PAC & fluides frigorigènes

Les descriptions ci-dessous sont génériques aux pompes à chaleur et groupes frigorifiques. Elles s'appliquent à toutes les installations et pas seulement les PAC sur eau de mer.

La pompe à chaleur va assurer le transfert d'énergie entre le milieu où est prélevée l'énergie thermique et les installations à servir. Son principe de fonctionnement s'apparente à celui du réfrigérateur.

- Elle prélève de l'énergie (E_r) dans un milieu à faible température : la mer (l'intérieur du réfrigérateur)
- Elle restitue cette énergie (E_c) dans un autre milieu à une température plus élevée (échangeur extérieur au dos du réfrigérateur ou comparativement les émetteurs des locaux à chauffer).
- Ce transfert nécessite un apport d'énergie extérieure (E_{elec} , ici de l'électricité).

L'énergie calorifique est récupérée au condenseur, l'énergie frigorifique est rejetée à l'évaporateur, l'énergie d'appoint (électrique ou autre) est nécessaire pour effectuer les cycles thermodynamiques.

Le fonctionnement d'une PAC ou d'un groupe froid met en œuvre les propriétés thermodynamiques des fluides et gaz frigorigènes. Chaque fluide a des caractéristiques spécifiques qui favorisent son usage dans certains domaines d'activité.

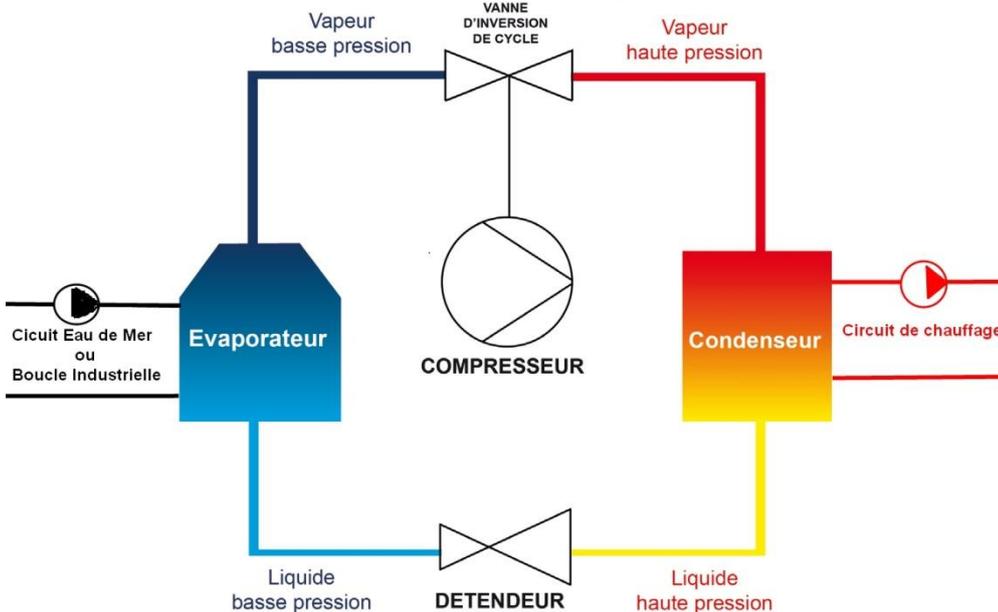


Figure 1 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur eau de mer (Source Dalkia)

Chaque PAC possède ses caractéristiques propres. En fonction des régimes de température appliqués à l'évaporateur et au condenseur, la puissance calorifique, la puissance frigorifique et la puissance absorbée varieront selon la technologie utilisée, le fluide frigorigène et le modèle.

Une PAC réversible est une machine que l'on fait fonctionner soit en privilégiant la production de froid, soit en privilégiant la production de chaud. Elle permet ainsi avec un même équipement soit de chauffer soit de rafraîchir un bâtiment.

Une thermo-frigo-pompe est une machine que l'on fait fonctionner pour une production simultanée de froid et chaud. Elle permet ainsi avec un même équipement de chauffer un système et d'en de rafraîchir un autre.

L'énergie utile étant supérieure à l'énergie « industrielle » consommée, on ne considère pas un rendement pour ce type de machine mais le COP (coefficient de performance). Le COP d'un système thermodynamique à compression est le quotient : énergie utile (chaleur et froid) sur énergie consommée. Dans cette définition, l'énergie consommée est limitée à celle utilisée par la machine seule. Pour intégrer parfaitement les énergies et pouvoir comparer avec d'autres solutions, il est indispensable d'intégrer toutes les énergies nécessaires à cette production d'énergie thermique, à l'exception des pompes de distribution qui seraient aussi utilisées avec une chaudière. La consommation des auxiliaires représentent de 15 à 50% de la consommation électrique totale d'une installation.

On distingue ainsi différents COP en fonction des énergies absorbées considérées :

- Consommation électrique des pompes eau de mer (E_{edm})
- Consommation électrique des pompes de distribution (E_{dist})

- Consommation électrique des compresseurs (E_{comp})

$$E_c = E_f + E_{elec}$$

$$COP_{\text{froid Machine}} = E_f / E_{elec}$$

$$COP_{\text{Chaud Machine}} = E_c / E_{elec}$$

$$COP_{\text{Total Utile}} = (E_c + E_f) / (E_{edm} + E_{elec} + E_{dist})$$

Le COP est dépendant de la technologie des machines, de l'écart entre les températures du côté froid et du côté chaud.

2.1.1 Diversité des machines

Le choix de la pompe à chaleur est déterminant lorsqu'elle est envisagée dans la conception d'un système de production d'énergie thermique. Le transfert de chaleur entre l'évaporateur et le condenseur ne peut se faire que dans certaines limites, qui sont caractérisées par les régimes de température au condenseur et à l'évaporateur. Ces limites sont imposées par le modèle de PAC retenu. Il est donc nécessaire en premier lieu de s'assurer auprès des fabricants que la PAC choisie permettra de répondre aux besoins thermiques dans tous les cas de figure, spécialement lors des périodes de faible charge.

De manière générale, en ce qui concerne les PAC à compression électrique, qui représentent la majorité des PAC disponibles sur le marché, on trouve différents modèles plus ou moins évolués.

Les modèles à régulation discrète, disponibles généralement pour les petites puissances, intègrent un ou plusieurs compresseurs. La puissance nominale de la PAC peut être modulée par le nombre de compresseurs mis en œuvre : ainsi une PAC de 50 kW à deux compresseurs permet des fonctionnements à 50 % de charge (25 kW) lorsqu'un seul compresseur est activé, ou à 100 % de charge (50 kW) lorsque les deux compresseurs sont activés. Lorsque la PAC ne dispose que d'un seul compresseur, la charge disponible n'est que de 100 % (fonctionnement en tout ou rien).

Les modèles à régulation continue, disponibles généralement à partir d'une certaine puissance (supérieure à 50 kW), embarquent la régulation nécessaire pour adapter automatiquement la charge aux besoins du bâtiment. Mono ou multi compresseurs, ils permettent de réguler de manière continue la charge entre par exemple 20 % et 100 % de la puissance nominale.

La régulation elle-même est plus ou moins évoluée en fonction des modèles. Elle peut ou non intégrer la surveillance d'une température de production en chaud et/ou en froid (consigne), le pilotage des pompes de circulation des circuits condenseur et évaporateur en mode tout ou rien ou en vitesse variable, la gestion d'alarmes plus ou moins fine...

Un autre aspect de la régulation intégrée à la PAC concerne sa capacité à communiquer et à être pilotée à distance par des protocoles standards, ce qui facilite son intégration.

En fonction de l'application, le choix de la PAC peut ainsi décharger le maître d'œuvre de certaines tâches auxiliaires, comme la mise au point d'une partie des automatismes nécessaires à la régulation de l'installation. Chaque PAC présente ainsi des caractéristiques propres en termes de puissance, de performance et de mise en œuvre, ce qui se répercute sur le coût de celle-ci. Cependant, ce coût doit être apprécié au regard des économies effectuées par ailleurs dans l'installation et lors de l'exploitation.

2.1.2 Sélection des machines

Les installations de PAC-EM sont composées de machines eau/eau standards ou adaptées. S'il y a une boucle intermédiaire d'eau de mer, les échangeurs devront être en matériaux adaptés, titane ou cupro nickel que peu de constructeurs proposent et réservent aux grosses puissances généralement supérieures à 1.5 MW.

Ces machines produisent de l'eau à différents régimes de températures suivant les usages.

- de l'eau glacée à des régimes de 6°C/12°C, 7°C/12°C pour la climatisation ou 15°C/20°C pour le rafraîchissement,
- de l'eau chaude à des régimes de 50°C/45°C ou 45°C/40°C pour le chauffage et le préchauffage de l'eau chaude sanitaire,
- de l'eau chaude sanitaire à 55°C dans certains cas
- Il existe des constructeurs qui proposent des machines qui produisent simultanément des températures froides de 5°C et chaudes supérieures à 80°C.

Suivant les dimensions de l'installation, il existe une très grande diversité de machines fonctionnant avec des fluides frigorigènes très variés dont la pérennité, à la date de rédaction de ce guide devra être validée avec le constructeur lors des études de faisabilité. La réglementation nationale relative à l'utilisation des fluides frigorigènes est disponible sur le site suivant : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/La-reglementation-nationale.html>

Côté compresseur, les machines peuvent être composées :

- de **groupes centrifuges** (pour les besoins importants et le plus souvent une puissance >1 MW), elles fonctionnent généralement en vitesse fixe mais sont aussi proposées de plus en plus en vitesse variable. Elles présentent des COP machine très performants. Certains constructeurs proposent des machines à paliers magnétiques qui autorisent une flexibilité de fonctionnement inégalée.

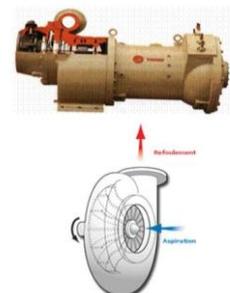


Figure 2 : compresseur centrifuge (Source Dalkia)

- Gammes de puissances : de 1,4 MW à 20 MW
 - COP_{chaud} à pleine charge > 5,0 (écart de température de $\sim 40^{\circ}C$), COP_{chaud} à pleine charge > 2,3 (écart de température de $\sim 75^{\circ}C$)
 - Durée de vie de 20 à 30 ans
 - Cette technologie est couramment utilisée pour la production de froid, la température de la chaleur récupérée excédant rarement $42-43^{\circ}C$ pour des machines standard. Il existe cependant des machines utilisées sur les réseaux de chaleur (Cf. exemple norvégien) qui fonctionnent à des températures > $80^{\circ}C$ (voir en annexe retour d'expérience).
- de **groupes à vis** (pour les puissances conséquentes > 250 kW), elles fonctionnent en vitesse fixe ou de plus en plus en vitesse variable et présentent des COP machine performants.
 - Gammes de puissances : de 250 à 1500 kWf (idem groupes à pistons)
 - COP_{chaud} > 4,5 (écart de température de $\sim 35^{\circ}C$),
 - Durée de vie de 15 ans à 30 ans

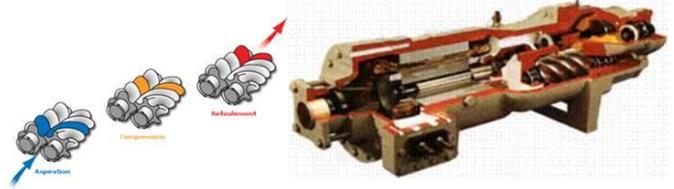


Figure 3 : Schéma compresseur à vis (Source Dalkia)

- de **groupes à pistons** qui sont aujourd'hui réservés pour des écarts de températures très importants, les COP sont médiocres.
 - Gammes de puissances : de 250 à 1500 kWf
 - COP_{chaud} > 3 (écart de température de $\sim 40^{\circ}C$)
 - Durée de vie de 20 à 30 ans



Figure 4 : Compresseur Piston (Source Dalkia)

- de **Scroll**
 - Machines de petite puissance < 100 kW pouvant être couplées en parallèle ou en série pour en augmenter les capacités. Production en écart de température limitée
 - Performances moyennes, $COP_{chaud} \sim 3$ ou supérieur si associé à un variateur de vitesse

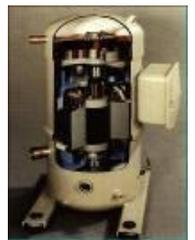
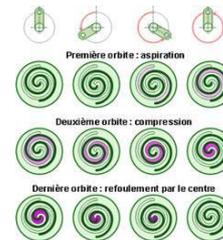


Figure 5 : Compresseur scroll (source Dalkia)

Une PAC nécessite un temps de démarrage avant de se mettre en condition pour produire de l'énergie de manière optimale. Ce délai dépend de chaque modèle. Des cycles de démarrage et d'arrêt répétés dégradent la machine et ses performances, des durées longues de fonctionnement à charge optimale doivent être privilégiées. Le dimensionnement doit être ajusté afin d'éviter des cycles de fonctionnement courts.

Pour permettre un éventail de puissance adaptée, il est possible, voire recommandé dans certains cas, d'utiliser plusieurs pompes à chaleur montées en cascade, de manière à permettre une régulation de charge la plus étendue possible.

Ainsi, d'optimiser au mieux les consommations des auxiliaires, les systèmes à vitesse variables seront privilégiés, en relation avec ce que les machines tolèrent. Les séquences entre machine seront adaptées en fonction de la cartographie de leurs performances et leurs technologies. Ainsi, 3 machines à vitesse et débit variables en marche simultanée à 30% de charge peuvent avoir une performance globale très supérieure à une seule de ces mêmes machines seule en fonctionnement à 90% de charge. A contrario, 3 machines à vitesse fixes fonctionnant à charge partielle risquent d'avoir une performance globale extrêmement dégradée.

2.2 Budget installation de production

Les coûts des installations de production, sont indépendants de la technologie eau de mer si une boucle intermédiaire est installée. Ils seront très équivalents à ceux de toute installation de PAC eau, auxquels il faudra ajouter le coût des installations spécifiques eau de mer. Ils sont immédiatement dépendants de l'écart de température nécessaire, des performances souhaitées et de la longévité attendue.

Le budget à envisager par kW installé, hors installation eau de mer variera ainsi pour des installations :

- Basse température de petite puissance (production < $45^{\circ}C$) de 100 à 150 €/kW
- Moyenne – haute température de puissance intermédiaire (production < $70^{\circ}C$) de 150 à 300 €/kW
- Haute très haute température de forte puissance (production jusqu'à $90^{\circ}C$) de 250 à 1000 €/kW

Les machines étant très différentes les unes des autres tant dans leurs performances que dans leur flexibilité, seule une étude énergétique détaillée permettra une sélection appropriée et de fixer le budget d'installation.

2.3 Part d'Énergie renouvelable à prendre en compte

La DIRECTIVE 2009/28/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 23 avril 2009 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables et modifiant puis abrogeant les directives 2001/77/CE et 2003/30/CE précise dans son article 5 : voir aussi la

La méthodologie et les définitions utilisées pour le calcul de la part de l'énergie produite à partir de sources d'énergie renouvelables sont celles établies par le règlement (CE) no1099/2008 du Parlement européen et du Conseil du 22 octobre 2008 concernant les statistiques de l'énergie

Qui est complétée par la Décision n° 2013/114/UE du 01 mars 2013 établissant les lignes directrices relatives au calcul, par les Etats membres, de la part d'énergie renouvelable produite à partir des pompes à chaleur pour les différentes technologies de pompes à chaleur conformément à l'article 5 de la directive 2009/28/CE du Parlement européen et du Conseil

Et dans son ANNEXE VII :

Comptabilisation de l'énergie produite à partir de pompes à chaleur La quantité d'énergie aérothermique, géothermique ou hydrothermique capturée par des pompes à chaleur, devant être considérée comme énergie produite à partir de sources renouvelables aux fins de la présente directive, ERES, se calcule selon la formule suivante:

$$E_{RES} = Q_{utilisable} * (1 - 1/FPS)$$

Sachant que:

- $Q_{utilisable}$ = la chaleur utilisable totale estimée qui est délivrée par des pompes à chaleur répondant aux critères indiqués à l'article 5, paragraphe 4, et mis en œuvre comme suit : seules sont prises en compte les pompes à chaleur pour lesquelles $FPS > 1,15 * 1/\eta$,
- FPS = le facteur de performance saisonnier moyen estimé pour lesdites pompes à chaleur,
- η représente le ratio entre la production brute totale d'électricité et la consommation énergétique primaire requise pour la production d'électricité et se calcule en tant que moyenne à l'échelle de l'Union, fondée sur les données Eurostat.

2.4 Impact des températures

2.4.1 Températures de consignes

L'écart entre le milieu froid et le milieu chaud a un impact majeur. Plus il est important, plus il va falloir d'énergie d'appoint pour assurer le transfert thermique, ainsi un congélateur consomme plus d'électricité qu'un réfrigérateur. C'est pourquoi, plus la température de consigne est basse, meilleure est la performance de la PAC.

Par exemple, une PAC de petite puissance de type scroll peut présenter les caractéristiques suivantes à charge optimale :

- pour un régime entrée/sortie évaporateur de 7 °C/2 °C et un régime condenseur de 30 °C/35 °C : si la puissance calorifique est de 71 kW, la puissance frigorifique de 57 kW et la puissance absorbée de 15 kW, le COP_{chaud} sera de 4,73 ;
- pour un régime entrée/sortie évaporateur de 7 °C/2 °C et un régime condenseur de 40 °C/45 °C, si la puissance calorifique est de 68 kW, la puissance frigorifique de 50 kW et la puissance absorbée de 19 kW, le COP_{chaud} sera de 3,57.

2.4.2 Delta T

L'écart entre les températures d'entrée et de sortie du condenseur qui correspond à celle du système à chauffer est toujours limité. Suivant la qualité de la machine, il est généralement de l'ordre de 5 °C, mais peut être de 20°C pour des machines industrielles. Le budget des machines est lié à cet écart car il conditionne les volumes des échangeurs et donc les quantités de matériaux nécessaires à la fabrication.

Cela correspond à un débit donné qui permet de fournir ou d'évacuer la puissance voulue. Si le débit est constant mais du fait d'une mauvaise conception, des mauvais réglages du système, des circuits de chauffage, le delta T n'est pas atteint, la machine ne produira jamais la puissance attendue. La machine va fonctionner à charge partielle avec des performances qui seront dégradées sauf à ce qu'elle soit conçue pour fonctionner à vitesse ou débit variable, ce qui reste rare.

De plus, si cette puissance doit être fournie, la machine étant limitée en puissance, il sera indispensable de démarrer une autre machine qui fonctionnera elle aussi à charge partielle.

Les performances globales de l'installation peuvent être très dégradées par un non-respect du delta T, aussi il est primordial de tout mettre en œuvre pour s'assurer du respect du delta T. Outre le parfait dimensionnement des émetteurs, il est indispensable que l'ensemble des régulations des systèmes de chauffage soient réalisés en vanne deux voies avec une régulation rigoureuse propre à garantir ce delta T

Diverses solutions s'imposent :

- Parfait dimensionnement des émetteurs, le plus grand possible
- Bannir les régulations d'émetteurs en vanne trois voies, systématiser les vannes deux voies
- Privilégier les circuits en débit variable
- Privilégier les systèmes en vitesse variable

En cas de contrat de vente d'énergie, il est recommandé d'introduire un terme de facturation sur le volume (par exemple €/m³) ou le non-respect de température (pénalité par €/MWh si la température retour client n'est pas suffisamment haute ou bonus si elle dépasse une valeur fixée).

2.4.3 Caractérisation des performances

Les machines sont généralement caractérisées par leur COP à pleine charge et températures nominales. Sauf quelques applications particulières, ces conditions seront très rarement celles auxquelles la machine fonctionnera. Pour mieux caractériser les performances, depuis l'automne 2006, Eurovent Certification évalue la performance des groupes de production d'eau glacée et groupes de production d'eau glacée réversibles en fonction de l'ESEER : European Seasonal Energy Efficiency Ratio. Cette certification permet d'avoir une meilleure image de la performance des machines dans leurs conditions réelles de fonctionnement.

L'ESEER donne un poids important à la performance des groupes de production d'eau glacée à charge partielle, plutôt qu'à puissance nominale. Ce programme de certification s'applique aux groupes de production d'eau glacée standard (LCP) alimentés en électricité utilisés dans le conditionnement d'air et la réfrigération. Les groupes de production d'eau glacée réversibles peuvent être certifiés en fonctionnement froid et chaud. Malheureusement, les pompes à chaleur en fonctionnement chaud seul sont exclues du programme.

Un écolabel sur les pompes à chaleur est en cours de mise en place, mais ne concerne pas encore des systèmes utilisables en pompe à chaleur sur eau de mer.

Ainsi, en l'absence de certification, seule la documentation du constructeur pourra servir de référence.

2.4.4 Performances réelles

Si cette documentation est généralement complète, il est indispensable pour garantir la tenue des performances de l'installation de connaître les performances de la machine aux différents points de fonctionnements et de prendre en compte l'ensemble des auxiliaires indispensables à ces différents points de fonctionnement.

Les lois de régulation mises en œuvre devront être conformes aux lois de fonctionnement considérées lors de l'étude thermique.

Pour mémoire, la consommation des auxiliaires représente couramment 27% de la consommation électrique totale d'une installation, mais peut monter à 200% dans certains cas de charges partielles qui représentent la majorité des temps de fonctionnement.

Ainsi, il est recommandé d'établir les modes de consommations chronologiques d'énergie thermique avec précision et de les mettre en relation avec les températures de l'eau de mer aux mêmes périodes. Ces valeurs vont permettre de spécifier puis sélectionner les machines les plus adaptées. De même, le constructeur de la machine doit pouvoir s'engager sur la cartographie des performances aux différents points de fonctionnement considérés.

2.5 Utilisation de l'énergie thermique produite

2.5.1 Détermination des besoins

Ce guide traite des particularités des installations de PAC sur eau de mer. Comme vu ci-dessus, les modes de fonctionnement ont un impact majeur sur la performance et la rentabilité des systèmes. Il est donc impératif de disposer d'une étude thermique soignée, décrivant dans le détail, si possible à pas de temps court et au minimum décrivant les simultanités entre la disponibilité de la ressource énergie marine, le prix de l'électricité et les différentes énergies thermiques produites.

Pour l'évaluation de besoins suivant les types d'usages et d'installation, nous vous invitons à consulter les guides ADEME afférents.

Il est important de noter que les charges de chaud et de froid obtenues en suivant la réglementation thermique sont des valeurs typiques et ne sont par conséquent pas représentatives des besoins réels de chaud et de froid du bâtiment. Ces besoins réels peuvent être approximés par la simulation thermique dynamique.

Le principal usage des PAC-EM est le chauffage et le rafraîchissement de bâtiments :

- Régime d'eau chaude à déterminer en fonction des usages et des systèmes, 40°C/35°C en plancher chauffant, ou 50°C/45°C ou plus suivant les émetteurs.
- Production simultanée de chaleur et de froid (fonctionnement thermo-frigo-pompe),
- Production de froid ou en appoint avec free-chilling (sans effet frigorifique) lorsque la température de l'eau de mer au captage est suffisamment basse et si les appareils terminaux ont été conçus pour fonctionner à un régime de température élevée (15°C/20°C au lieu du régime habituel de 7°C/12°C).

La production d'eau chaude sanitaire est aussi possible, mais dégradera le COP et nécessitera une étude d'opportunité particulière.

2.5.2 Chauffage de bâtiments – Les différents émetteurs

Les systèmes de chauffage à eau répondent à des lois d'eau qui permettent que la chaleur soit correctement utilisée. Cette loi est conditionnée

par l'usage et les émetteurs. Les systèmes anciens et traditionnels fonctionnent à des régimes de températures élevées, 90°C/70°C, ou 70/50°C. Afin de permettre les meilleures performances, il faut chercher à baisser autant que possible ces régimes de températures ou tout au moins les faire varier en fonction de la température extérieure. Un système ancien doit savoir fonctionner après rénovation d'un bâtiment et adaptation des équilibrages et régulation à des températures plus faibles.

La température en sortie de condenseur doit correspondre ou être supérieure à celle demandée par le système à chauffer.

L'utilisation des PAC ne peut se faire qu'avec une parfaite adéquation avec les régimes de température d'utilisation du chauffage qui dépendent du type d'émetteurs installés dans les bâtiments. Les systèmes à basse température seront systématiquement privilégiés afin de permettre les meilleures performances possibles. Cela a des conséquences sensibles sur l'investissement du fait :

- des appareils terminaux qui devront être de taille supérieure ou en plus grand nombre,
- de l'intégration des systèmes dans les locaux à traiter puisque à puissance égale, un émetteur dimensionné en régime basse température aura un encombrement nettement supérieur à un émetteur dimensionné en haute température, les canalisations ont un diamètre plus fort si le delta T baisse. Il faut distinguer les émetteurs classiques (radiateurs à eau, planchers chauffants) des techniques en émergence (plafonds rayonnants, panneaux radiants...). L'adéquation entre les régimes de température des PAC et des systèmes à servir en fonction des émetteurs est de la responsabilité du bureau d'étude thermique.

2.5.2.1 Planchers chauffants

Compte tenu de leur grande surface d'émission et donc de leurs régimes de températures bas, les planchers chauffants sont parfaitement adaptés à un chauffage par pompe à chaleur.

Ils permettent aussi, moyennant certaines précautions (risques de condensation), de rafraîchir les locaux. C'est un système simple qui est bien adapté au régime basse température (16-19 °C). La puissance en froid d'un plancher est limitée : environ 35 W/m² de SHON.

2.5.2.2 Plafonds rafraîchissants hydrauliques

Ils sont utilisés pour le rafraîchissement, le transfert de chaleur se fait par rayonnement et convection avec la possibilité d'utilisation directe de l'énergie marine pour le rafraîchissement ou le hors-gel. Par rapport aux planchers, les plafonds rafraîchissant hydrauliques ont des puissances de rafraîchissement nettement plus élevées : de 60 à 80 W/m². Il est à noter que ce type de système demande une coordination précise pour intégrer dans le plafond les luminaires, les diffuseurs et les autres systèmes tels que sprinklers et appareils de détection. La maintenance des éléments est minimale et le système est très peu bruyant. Les planchers et plafonds rayonnants hydrauliques peuvent être constitués de tuyaux directement coulés dans la dalle de béton ou d'éléments métalliques localisés en sous plafond.

2.5.2.3 Radiateurs à eau

Les radiateurs à eau fonctionnent généralement à des températures plus élevées que les planchers chauffants, la plus faible surface nécessite un niveau énergétique plus élevé. **Il y a donc intérêt à disposer d'émetteurs de la plus grande surface possible pour abaisser les régimes de températures d'émission et améliorer les performances de la PAC.** Le passage d'un régime d'eau standard de 80/60 °C à un régime d'eau de 50/40 °C implique une augmentation de la surface du radiateur de 150 %. Une rénovation de bâtiment avec renforcement de l'isolation peut permettre cette modification des régimes de températures sans changer les radiateurs. Le bureau d'étude thermique doit s'assurer de l'efficacité opérationnelle projetée des régimes d'eau prévus pour les PAC.

2.5.2.4 Émetteurs à air

Les régimes de température des systèmes aérauliques en chauffage sont généralement élevés et ne sont pas bien adaptés aux PAC. Pour avoir des régimes de température bas, il est indispensable d'avoir des batteries d'échange de grande surface dont le prix est souvent mal accepté par les maîtres d'ouvrages. Cependant, en cas de nécessité de rafraîchissement, des systèmes aérauliques deux tubes ou quatre tubes peuvent être des solutions intéressantes.

La conception et la mise en œuvre des systèmes aérauliques doivent être réalisées en portant une attention particulière pour éviter les inconvénients souvent attachés à ce genre de systèmes (courant d'air, niveau sonore élevé, sensation de trop chaud ou de trop froid...).

Les systèmes les plus couramment utilisés sont les ventilo-convecteurs 2 ou 4 tubes ou « 2 tubes - 2 fils ». Des techniques performantes arrivent sur le marché (plafond diffusant ou poreux) mais leurs coûts demeurent encore très élevés.

2.5.3 Production d'ECS (Eau Chaude Sanitaire)

Les températures d'eau chaude sanitaire sont encadrées par divers textes décrits au chapitre réglementation.

La production d'eau chaude sanitaire (ECS) à partir de la PAC oblige à chauffer l'eau à une température élevée compatible avec les obligations réglementaires. Une température de 70°C peut être requise pour la réalisation de chocs thermiques. Un minimum de 55°C est requis.

L'ECS peut être produite à partir d'une PAC dédiée d'un système intégrant les deux fonctions ECS et chauffage.

La production d'ECS est très intéressante pour les systèmes PAC-EM car elle permet d'assurer un taux d'usage important du système. Cependant, la variabilité du tirage d'ECS et son niveau de température nécessite des approches techniques de bon niveau pour envisager :

- la mise en place de stockages afin de lisser la charge thermique sur la PAC et de pouvoir éventuellement optimiser les consommations

électriques

- La mise en place de systèmes de gestion de priorités entre le chauffage et l'ECS, spécialement en cas de PAC combinée ECS chauffage afin de répondre à l'ensemble de la demande.

La production d'ECS peut aussi être réalisée en été en récupérant la chaleur des groupes froid qui, au lieu d'être évacuée en mer, produira l'ECS. Une attention particulière sera demandée au BET afin de valider que la hausse générale et constante de température au condenseur ne nuit pas aux performances globales du système. Des adaptations devront être réalisées sur la conception de la production.

Ainsi la production directe d'ECS à une température supérieure à 55°C à partir de groupes frigorifiques dédiés ne permet souvent pas d'obtenir des performances énergétiques satisfaisantes, même si elles sont supérieures à celles d'une chaudière électrique. L'utilisation de PAC dédiées en cascade (alimentée en eau chaude sortie des groupes froid au niveau de l'évaporateur) pourra produire l'eau chaude sanitaire à 55°C/60°C avec de meilleures performances mais nécessite des aménagements hydrauliques et des sélections de PAC plus contraignantes mais dont la rentabilité est avérée. Il est aussi possible de produire l'ECS à partir d'une eau chaude à 45°C/40°C (niveau de température pour le chauffage), avec un appoint électrique, mais l'étude d'une PAC équivalente pourra montrer le moindre intérêt d'un tel système sauf en secours.

Le choix du mode de production de l'ECS dépend de la quantité d'ECS à produire et du dimensionnement de l'installation globale.

De nombreuses solutions et organisations de production performantes sont proposées par les constructeurs de machines, bureaux d'études et sociétés spécialisées.

2.5.4 Rafraîchissement des bâtiments

L'installation PAC-EM peut aussi être utilisée pour le rafraîchissement de bâtiments. La température de la mer est intéressante pour faire condenser des groupes froids en été et si elle reste basse en période de besoins, elle peut être directement utilisée pour faire du free chilling total ou partiel.

Comme pour le chauffage, les régimes de température sont très importants pour la performance. On cherchera à privilégier les régimes les plus hauts possible. Il faut noter que la climatisation (contrôle de l'hygrométrie de l'air) nécessite des températures plus basses (généralement 7-12°C) que le rafraîchissement (au-dessus de 15°C). Les émetteurs en rafraîchissement nécessitent beaucoup plus de surface d'échange que ceux pour la climatisation.

En intersaison, il est possible d'envisager la production simultanée de chaleur et de froid avec un fonctionnement en thermo-frigo-pompe. Cependant les occurrences réelles, hormis pour l'ECS restent rares et cette solution sera d'autant plus efficace qu'elle sera couplée à des solutions de stockages (chaud et ou froid) afin de valoriser au mieux les énergies qui ne sont pas produites au moment opportun. Elles sont stockées quelques heures dans des ballons pour être livrées au moment où elles seront le plus utiles. Ces solutions permettent en outre de limiter l'impact des rejets thermiques sur le milieu marin.

2.5.5 Modes de régulation

La mise en place et le réglage des régulations sont extrêmement importants dans ce type de projet et les phases d'étude et de mise au point doivent être particulièrement soignées.

Comme vu au 2.4.4, il est indispensable de fixer dès les études les modes de fonctionnement et de mettre en place les compétences nécessaires lors des phases de mise au point des détails.

Du fait des particularités de fonctionnement des PAC et des choix techniques, spécialement si le choix de machine à vitesse fixe ou de thermo-frigo-pompe est fait, l'étude de stockage doit être envisagée. Il permet d'optimiser les plages de fonctionnement et le dimensionnement des machines, lisser les variations de charges et donner de la flexibilité à l'installation lors de projet de construction et raccordements évolutifs.

2.5.6 Taux de couverture et simultanéité des besoins

Le choix du taux de couverture modifie grandement l'investissement de départ. Il n'est donc parfois pas judicieux de couvrir la totalité des besoins avec la solution de PAC-EM pour que celle-ci soit rentable.

La décision de couvrir les puissances crête de chaud et/ou de froid ou d'installer une puissance maximale limitée mais couvrant un fort pourcentage des consommations ou la décision de dimensionner le système pour obtenir un maximum de « rafraîchissement direct dépendent de la ressource disponible, des résultats de l'analyse en coût global et de la démarche environnementale de l'investisseur. Une comparaison en coût global permet de prendre une décision finale. Elle met en perspective la complexité de l'installation, sont coût d'investissement et les coûts énergétiques (consommations des équipements et auxiliaires) et de maintenance avec le bénéfice environnemental.

Les besoins réels au pas de temps horaire approximés par la simulation thermique dynamique doivent être pris en compte pour comparer l'impact d'un abaissement du taux de couverture sur les consommations. Une étude chronologique doit permettre d'analyser les taux d'usages et nombre de démarrages des machines et investissements et justifier le taux de couverture. Des choix de compléments par d'autres énergies (gaz, électricité...) doivent être envisagés en cas de fortes fluctuations afin de conserver une pression économique acceptable sur le projet.

Dans les projets où les besoins du froid sont dominants, il peut être bénéfique de mettre en place un système couvrant la puissance de

chauffage et de rejeter les calories en surplus grâce à un système de refroidissement additionnel. De même, dans les projets où les besoins du chaud sont dominants, il peut être bénéfique de mettre en place une chaudière pour injecter les calories additionnelles et dimensionner le circuit sur la puissance de climatisation. L'ajout de ces équipements a néanmoins un impact sur la maintenance, l'investissement et la taille des locaux techniques qu'il faudra prendre en compte dans les calculs de retour sur investissement et l'étude de faisabilité.

2.6 Différentes typologies d'installations

2.6.1 Principe

Différentes typologies d'installation sont possibles suivant que l'eau de mer circule plus ou moins loin dans le système et que les machines sont centralisées ou non.

Certaines installations font passer l'eau de mer directement dans les machines (installations de très fortes puissances scandinaves).

Dans le cas d'installation centralisée, une boucle de transfert unique peut assurer le transfert thermique entre l'eau de mer et les évaporateurs et condenseurs de l'installation thermo-frigorifique, mais il peut aussi y avoir plusieurs boucles de transfert eau de mer/condenseurs et de transfert eau de mer/évaporateurs.

Il est possible que la boucle de transfert alimente des installations de production thermo-frigorifiques décentralisées.

- Le réseau de distribution devra être géré en débit variable pour correspondre autant que possible à la demande en énergie.
- Les différents schémas ci-dessous présentent le minimum des capteurs et compteurs indispensables au suivi de performances de l'installation. Les données de ces instruments seront systématiquement archivées sur des pas de temps courts afin d'assurer un suivi de performances pertinent.

2.6.2 Installation de production centralisée

Dans le cas d'une installation de production d'eau glacée ou d'eau chaude centralisée, il y a un réseau de distribution qui fonctionne au régime de température d'utilisation :

Domaine d'application : couverture des besoins d'un ou de plusieurs établissements implantés dans un périmètre réduit

- Avantages :
 - optimisation de l'efficacité énergétique par une production centralisée et fiabilisée
 - fourniture d'eau glacée et d'eau chaude à l'utilisateur final (garantie de résultats)
- Inconvénients :
 - extension de l'installation moins facile

2.6.2.1 Installation centralisée alimentée directement en eau de mer

Dans le cas d'une installation avec production centralisée, il est possible d'alimenter les machines directement en eau de mer sans boucle intermédiaire.

- Avantages :
 - Limitation des investissements de l'ensemble pompage, échangeur et boucle.
 - Amélioration des performances par la suppression d'un pompage et d'un pincement d'échangeur.
- Inconvénients :
 - Surcoût de chaque équipement de production, difficulté de trouver des fournisseurs si petite puissance
 - Gestion de l'encrassement de l'évaporateur de la PAC
 - Diffusion de l'eau de mer dans la machine en cas de tube fuyard.
 -
- Exemple type : réseau de chaleur de Stockholm par alimentation directe des machines en eau de mer

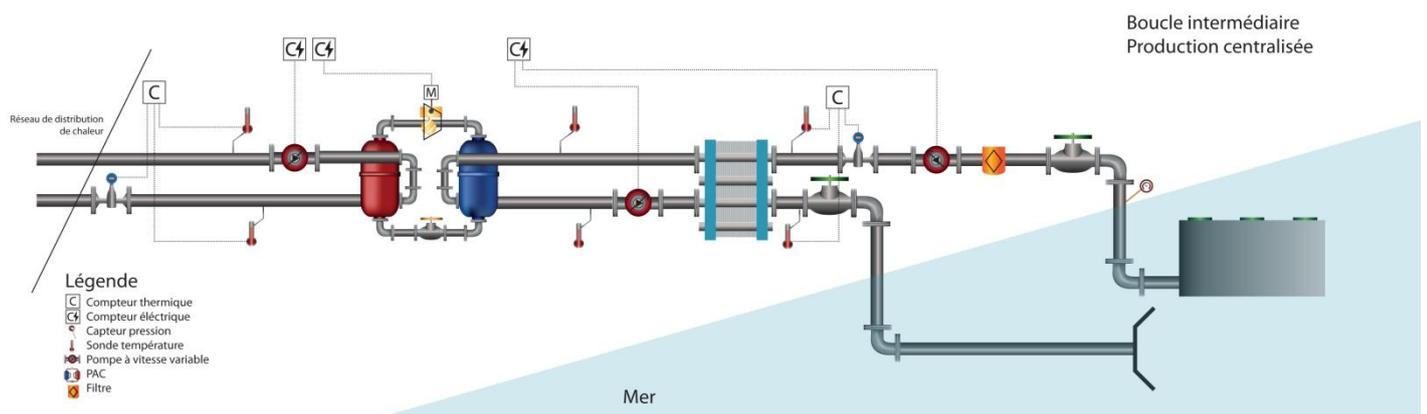


Figure 6 Production centralisée alimentée directement en eau de mer (Source Dalkia)

2.6.2.2 Installation centralisée avec boucle intermédiaire en eau industrielle

- Avantages :
 - Machines moins onéreuses
 - Régulation machine basique.
- Inconvénients :
 - Encrassement échangeur à plaque plus sensible que l'échangeur tubulaire de la machine
 - Accumulation de pincement d'échangeurs et de pompes qui défavorisent les performances
- exemple type : Installation de Cherbourg quartier de la Divette

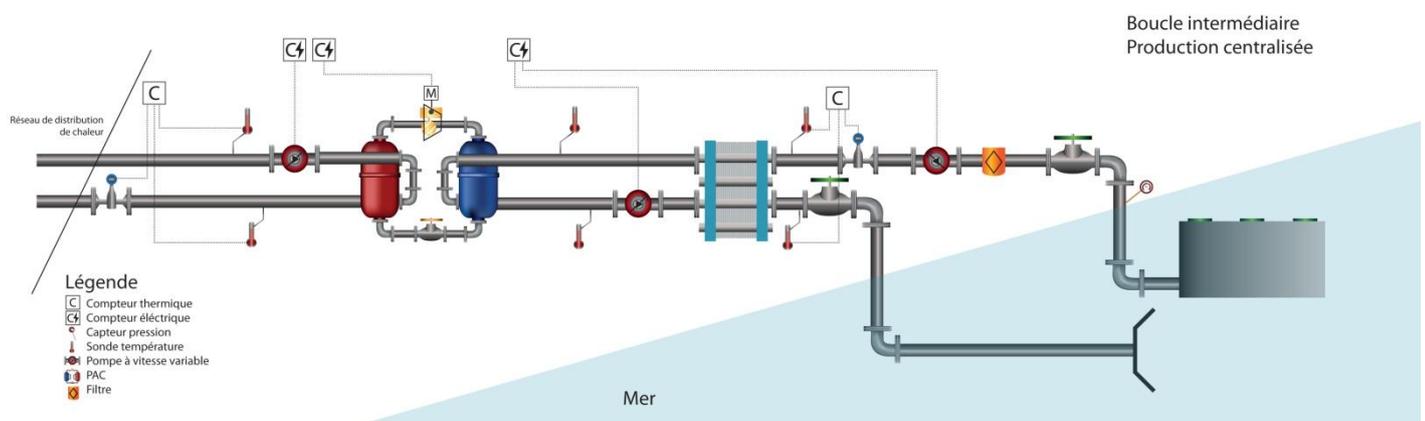


Figure 7 Production centralisée avec boucle intermédiaire (Source Dalkia)

2.6.3 Installation multi productions

2.6.3.1 Installation avec boucle d'eau tempérée

Dans le cas d'une installation sans production centralisée, une ou des boucles d'eau tempérée sont utilisées. Elles assurent le transfert de chaleur entre l'eau de mer et les condenseurs et évaporateurs des installations thermo-frigorifiques :

Domaine d'application : couverture des besoins de sites réalisés en plusieurs phases et possédant des besoins différents

- Avantages :
 - Réduction de la longueur des réseaux d'eau glacée et d'eau chaude
 - Adaptabilité et souplesse face au phasage d'un grand projet urbain, et à l'intégration de nouveaux clients à proximité de la boucle de transfert (prévoir en conséquence le local eau de mer et le diamètre des tuyaux adapté)
 - Possibilité de connecter des productions de froid et de chaud sur une même boucle.
- Inconvénients :
 - Chaque site doit comporter sa propre installation de production de froid et de chaleur
 - L'utilisateur final ne profite pas de l'effet d'échelle d'une installation centralisée et des performances associées

La boucle tempérée devra être gérée en débit variable pour correspondre autant que possible à la demande en énergie. La boucle de tempérée peut être alimentée directement par l'eau de mer ou si l'on installe un système d'échangeur adapté, cette boucle peut être en eau douce industrielle.

2.6.3.2 Installation avec boucle tempérée en eau industrielle

Des échangeurs sont installés entre l'eau de mer et la boucle de transfert :

- Avantages
 - Gestion centralisée de l'encrassement
 - Réduction des investissements par rapport à un réseau en température
 - Inconvénients :
 - Surcoût relatif à l'installation des échangeurs eau de mer, local et équipement
- Ces systèmes sont à privilégier face aux systèmes de boucle tempérée en eau de mer.

- exemple type : Installation de La Seyne sur Mer

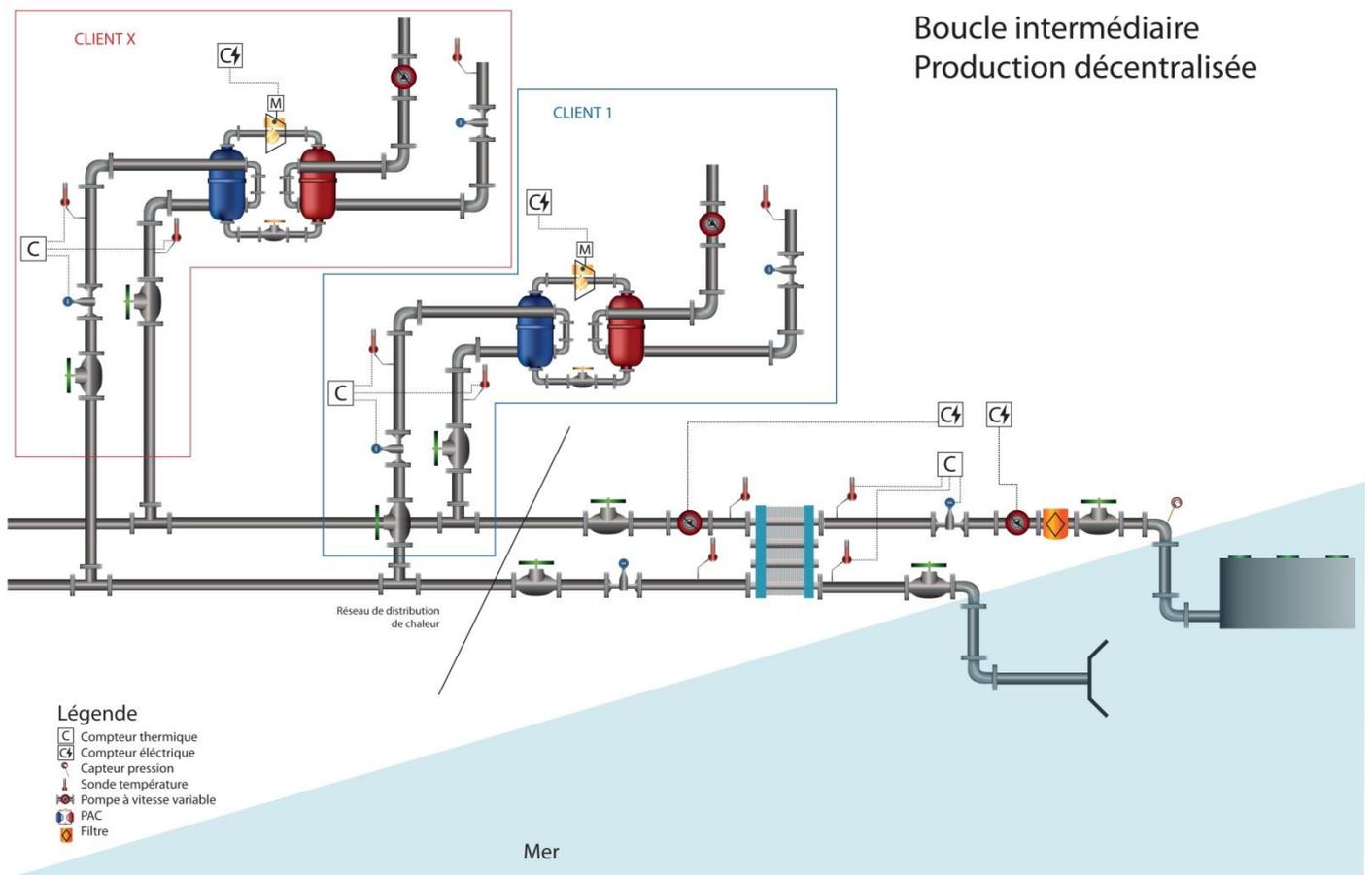


Figure 8 Production décentralisée avec boucle tempérée en eau industrielle (Source Dalkia)

2.6.3.3 Installation avec boucle tempérée en eau de mer

Dans le cas d'une installation sans production centralisée, une boucle de transfert alimentée directement par de l'eau de mer peut être utilisée.

Avantage

- Limitation des investissements du local pompage et échangeur.
- Flexibilité

Inconvénients :

- Surcoût de chaque équipement de production, difficulté de trouver des fournisseurs si petite puissance
- Gestion de l'encrassement qui se diffuse dans toute la boucle et est favorisé par la faible vitesse
- Diffusion eau de mer dans le milieu en cas de fuite de la boucle de transfert

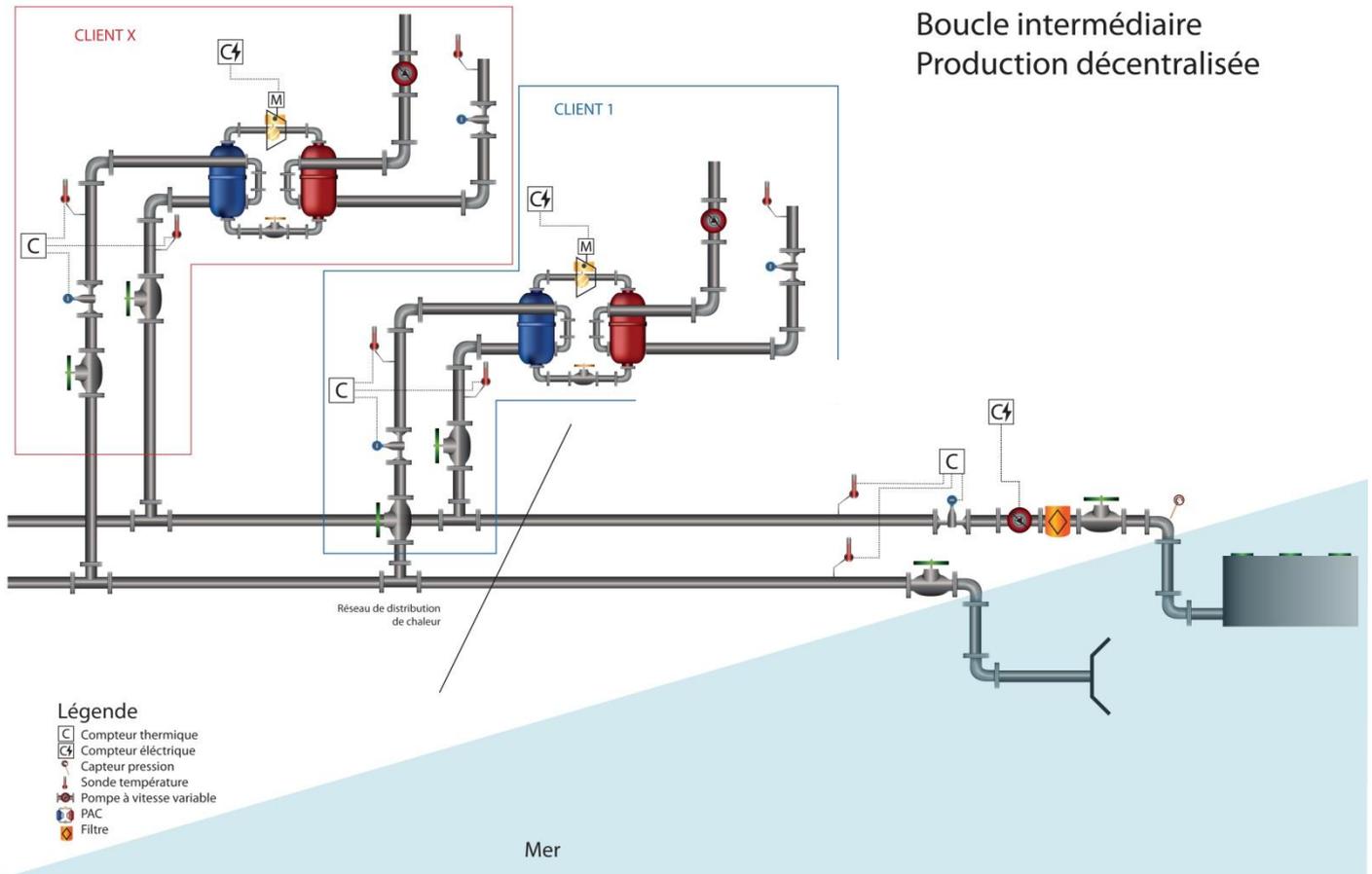


Figure 9 Production décentralisée avec boucle tempérée en eau de mer (Source Dalkia)

2.6.3.4 Installation centralisée et multi-productions (avec boucle intermédiaire)

Il est possible de combiner les deux systèmes avec par exemple une pompe à chaleur centralisée qui ne fonctionnerait que pendant les périodes de chauffage et des pompes à chaleur ECS qui fonctionneraient toute l'année avec des températures évaporateurs variables. Aucune installation de ce type ne semble être en exploitation en France.

3 GESTION D'UN PROJET DE PAC SUR EAU DE MER

3.1 Principe d'une PAC sur eau de mer

Le principe d'une PAC-EM consiste à utiliser la mer comme source chaude en hiver et source froide en été. Le schéma suivant illustre le fonctionnement hiver dans lequel la thermo-frigo-pompe prélève de la chaleur sur l'eau de mer pour la transférer aux appareils de chauffage des bâtiments.

Le principal avantage d'un système PAC-EM est la disponibilité de la ressource maritime et sa très faible intermittence comparée aux systèmes

solaires et éoliens.

Un système de pompe à chaleur sur eau de mer nécessite :

- une prise d'eau en mer pour pomper l'eau de mer nécessaire à l'échangeur thermique
- une boucle eau de mer, les canalisations aller et retours nécessaires au transfert de l'eau mer vers
- un local comprenant des pompes, généralement un ou des échangeurs
- un ouvrage de rejet lui-même
- une ou des boucles intermédiaires entre le local et les systèmes de production
- un ou des réseaux de distribution de l'énergie thermique

La spécificité d'une installation de PAC sur eau de mer réside principalement dans le captage, la boucle eau de mer, et le rejet en mer. L'utilisation de l'énergie thermique des PAC est traitée comme un projet conventionnel dont dépendront en grande partie les performances de l'installation en termes de coût global.

Les installations de PAC-EM sont implantées au niveau de villes côtières. Elles visent des zones suffisamment urbanisées ayant des besoins de chaleur (chauffage et ECS) ou du froid. Ce procédé se substitue ou complète la mise en place de chaudières, de groupes frigorifiques ou de tours aéroréfrigérantes.

Afin de rentabiliser les équipements de captage et de rejet en mer dédiés, ces installations doivent généralement être dimensionnées pour des besoins énergétiques et puissances importantes de plusieurs centaines de kW voire plusieurs MW.

Les PAC-EM ont une conception proche de celles d'installations thermo frigorifiques utilisant comme source chaude et froide les fleuves (par exemple La Défense à Paris) et les lacs.

Il existe de nombreuses installations en France et à l'étranger (Voir liste indicative en annexe).

Hors de France, certains pays disposent d'installations conséquentes telles que :

En Scandinavie divers systèmes sur eau de mer sont en service depuis plusieurs années

- Stockholm : réseau de chaleur et de froid : 7 millions de m² sont rafraîchis par des PAC-EM à Stockholm, avec des COP très élevés lors des fonctionnements l'hiver en free chilling de l'eau de mer (3°C) à travers des échangeurs sans apport par machine effet frigorifique pour alimenter le réseau de froid).
- Projet GENILAC en cours de développement à Genève

Monaco compte actuellement une soixantaine de PAC-EM de toutes tailles.

En France, diverses installations sont, ou ont été, en service,

- Casino de Biarritz avec un captage dans la plage
- Immeuble casino de Cherbourg (plus en service) avec un captage dans le port des ferries
- Réseau de la Divette Cherbourg avec un captage dans le bassin de pêche.
- Il existerait en France des PAC-EM implantées dans plusieurs établissements de thalassothérapie qui utiliseraient les ouvrages de captage en mer pour la production de chaleur et de froid.

3.2 Méthodologie de ciblage de projet PAC-EM

La grille de critères ci-après doit permettre de bien cibler la pertinence d'une solution de PAC-EM. Plus il y a de réponses dans la colonne de droite, plus le projet sera facile à réaliser et potentiellement efficace et rentable.

Critère	Défavorable  Favorable		
Température caloporteur	> 55°C	55°C – 45°C	< 45°C
Température frigoporteur	< 7°C	7°C – 15°C	> 15°C
Besoins saisonniers	Chaud modéré hiver, froid fort été, basculement mi saison	Chaud en hiver, froid en été, les 2 en simultanée en mi saison	Chaud et froid combinés toute l'année
Puissance nécessaire	< 500 kW	< 500 kW et < 1 MW	> 1 MW
Distance entre bâtiment - mer	> 2 km	0,5 à 2 km	< 500 m
Profil du lieu de captage	Côte escarpée rocheuse, battue par les tempêtes	Côte abritée avec pente rapide mais régulière	Port
Biodiversité aux captages et rejet	Très sensible	Fragile	Faible
Marée avec un marnage sensible	Fort	Modéré	Faible
Variation T° EDM	Forte > 25°C été et < 10°C hiver	Fluctuant 10 à 25°C	Stable
T° EDM pour PAC	Hiver < 6°C	Hiver > 12°C	Hiver > 16°C
T° EDM pour GF	Été > 26°C	Été < 20°C	Été < 17°C

Une fois le principe d'un projet acté, les exigences de mise en œuvre doivent être envisagées :

- Fiabilité des données thermiques des consommateurs, types d'émetteurs, spectres de consommations et évolution de ceux-ci.
- Localisation de l'implantation des ouvrages de captage et de rejet
- Faisabilité technique du captage : Température de l'eau de puisage et profil bathymétrique associé
- Réalisation d'une étude d'impact sur le milieu marin, dont la précision dépend de la taille de l'installation, respect des températures, généralement > 30°C avec un delta T maxi fixé
- Maîtrise et anticipation des démarches administratives
- Choix de la technologie du captage et des matériaux et équipements
- Choix du type de réalisation : avec ou sans boucle de transfert
- Longueur du réseau et ou de la boucle de transfert

Les exigences d'exploitation doivent ensuite être étudiées :

- Maintenance et surveillance régulière des installations de captage pour assurer la pérennité de l'installation (protection contre les algues et autres pollutions),
- Nécessité d'un pilotage judicieux de l'installation pour permettre d'atteindre les meilleures performances énergétiques,
- Retour d'expérience dans le cadre d'un processus d'amélioration continue de la qualité pour les nouvelles installations.

3.3 Captage et rejet en mer

3.3.1 Etudes préalables de la zone d'implantation

Suivant la zone d'implantation, divers relevés de différentes qualités devront être réalisés :

- profils de température permettant de valider la réalité de la ressource indépendamment des saisons,
- étude géophysique marine,
- étude hydrodynamique.

L'implantation le long d'un quai dans un port en eau profonde nécessitera des moyens limités, celle sur un fond marin très sensible dans une zone à marnage sera plus complexe.

Les moyens devront être adaptés en fonction de l'ampleur des projets.

3.3.1.1 Relevés bathymétriques et topographiques

Dans le cas d'implantation dans une zone de fond naturelle, les données disponibles sont souvent insuffisantes et ne permettent que d'apprécier la morphologie générale des fonds. Un lever bathymétrique spécifique au moyen d'un échosondeur mono (pour une première approche à un stade de faisabilité) ou multi faisceaux permet d'apprécier plus finement la morphologie des fonds (à un stade plus avancé du projet, indispensable pour les études de détails). Les sociétés spécialisées sont équipées pour réaliser ces prestations.

Un relevé précis de la zone d'atterrage ou du point de départ de la canalisation est nécessaire. Il doit être établi en cohérence avec le lever bathymétrique (mêmes références géodésiques, recouvrement des points de levés terrestre et maritime) afin de pouvoir réaliser un modèle numérique de terrain (MNT) précis.

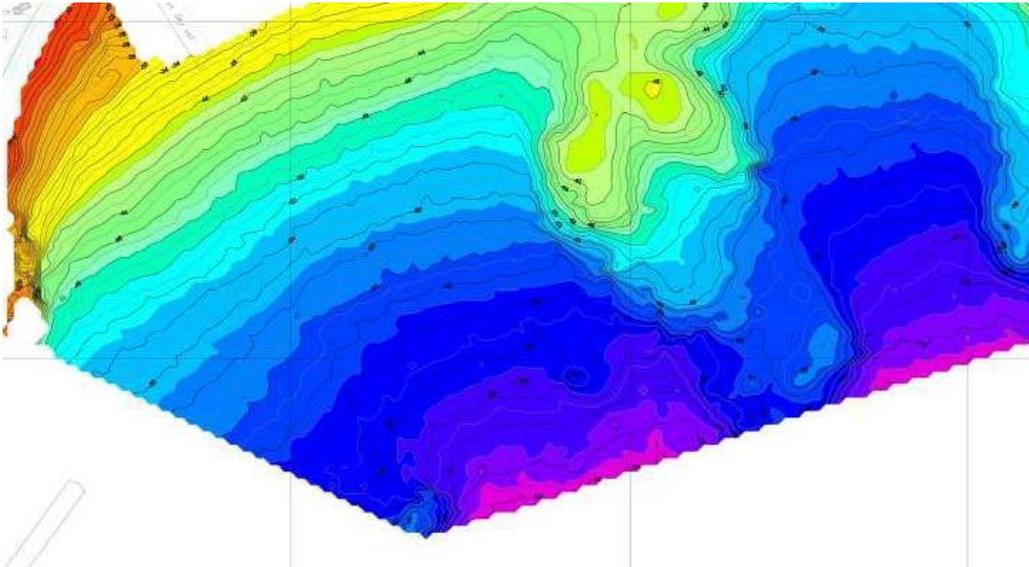


Figure 10 : Modèle Numérique de Terrain (Source Egis)

3.3.1.2 Relevés morphologiques des fonds

Afin d'identifier de manière précise les limites de zones de changement de faciès (vase-sable-roche) et d'identifier les objets présents sur le fond (blocs, épaves, conduites, câbles, munitions, etc.), il est conseillé de réaliser un enregistrement en continu d'images de la surface des fonds, au moyen d'un sonar à balayage latéral. Cet équipement procure dans un temps très réduit, une visualisation par mesure acoustique, de la nature et de la morphologie des fonds marins avec une résolution de l'ordre du mètre. Les obstacles éventuels, de dimensions supérieures à 1 mètre ou les épaves sont également repérés, même en présence d'eaux turbides.

L'analyse de la répartition des sédiments et des figures sédimentaires du fond apporte également des informations précises sur la dynamique sédimentaire locale.



Figure 11 : Détermination benthos et substrat meuble : prélèvement, tamisage et identification (Source Créocéan)

3.3.1.3 Reconnaissance sismique

L'ensouillage ou l'ancrage de la conduite sur le fond nécessite de connaître les épaisseurs de sédiments meubles c'est-à-dire la position du substratum rocheux sous-jacent. Cette épaisseur peut être évaluée au moyen d'une reconnaissance sismique (sismique réflexion). Cette technique consiste à enregistrer, à la surface de la mer, des échos issus de la propagation dans le sous-sol d'une onde sismique provoquée (le plus généralement, un son).

3.3.1.4 Détermination de la nature et des caractéristiques dimensionnelles des sols

À l'issue des missions de reconnaissance cartographique, une campagne de prélèvements des principaux faciès représentatifs des sédiments est à mener à l'aide d'une benne, par carottage ou par plongeur. Les sédiments meubles prélevés doivent faire ensuite l'objet d'analyses granulométriques pour en déterminer la nature et les caractéristiques dimensionnelles.

3.3.1.5 Détermination des caractéristiques mécaniques des sols

Les données géophysiques précédemment recueillies permettront de caractériser le tracé de la conduite et de déterminer les caractéristiques intrinsèques des fonds marins sur lesquels sera installée la conduite. Les possibilités de stabilisation de la conduite à partir de ces propres caractéristiques seront alors proposées.

En complément des caractéristiques de surface des sédiments, des investigations peuvent être menées avec comme objectifs de :

- déterminer la stabilité des sédiments sous l'action de la houle, les risques d'affouillements et de liquéfaction du sol,
- évaluer la présence, la dureté de la roche pour définir les méthodes de contournement ou de déroctage si nécessaire,
- définir des paramètres intrinsèques du sédiment.

Dans ce but il est nécessaire de réaliser spécifiquement :

- des prélèvements de sédiments et de roche en vue d'essais et analyses en laboratoire,
- des essais et analyses en laboratoire (granulométrie, résistance de la roche, détermination des paramètres intrinsèques, etc.),

À l'issue de cette campagne de reconnaissance géophysique / géotechnique, les fonds marins seront alors parfaitement déterminés et le mode de fixation des conduites déterminées. L'estimation financière de la partie offshore (de l'ordre de 50 à 60% d'un budget type) pourra alors être effectuée.

3.3.1.6 Reconnaissance et caractérisation des écosystèmes marins

Pour orienter le tracé de la canalisation et/ou positionner la prise d'eau en engendrant un impact minimal du projet sur les biocénoses marines existantes dans la zone d'étude, il est nécessaire :

- d'identifier les différentes biocénoses et habitats sensibles : roches à algues photophyles, herbier de posidonies ou de zostères, coralligènes, roches isolées ainsi que les espèces protégées (grande nacre, corail rouge, mérrou...).
- de décrire leurs caractéristiques écologiques et patrimoniales en fonction des données bibliographiques existantes d'une campagne de reconnaissance in situ,
- de préciser leur délimitation géographique,
- d'établir une carte de synthèse de la sensibilité de la zone d'étude en fonction de la valeur patrimoniale des biocénoses

Cartographie des biocénoses. Source : Ville de Sainte-Maxime et In Vivo Environnement

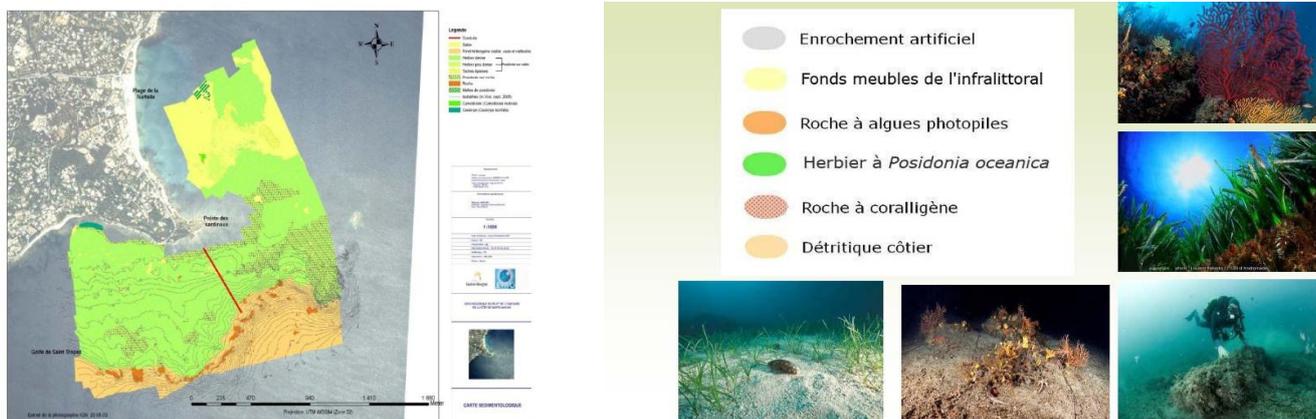


Figure 12 : Typologie des biocénoses méditerranéennes (infralittoral, circalittoral). (Source : Andromède Océanologie)

3.3.1.7 Budget des études préalables

Pour des projets de puissance modérée ne nécessitant le pompage que de quelques m³/h d'eau de mer, les études devront être adaptées en concertation avec les autorités en fonction de la zone de captage et de rejet. Le paragraphe ci-après cible les projets de puissance conséquente nécessitant des pompes d'eau de mer qui dépassent plusieurs dizaines de m³/h.

Le budget des études préalables sera fonction de la zone d'implantation et de rejet. En fonction de l'ampleur du projet, (pompage de 50m³/h ou de 5000 m³/h), de la nature de la zone d'implantation (fond de sable et posidonie ou bassin artificiel), la nature des études et leur portée seront très différentes. Le tableau ci-après récapitule les ordres de grandeurs des budgets pour ces études dans le cadre de projets importants.

Thème	Définition des prestations	Budget estimatif
Données océano-météorologiques (houle / agitation)	Connaissance des régimes de houles au large à partir de données satellitaires, calcul des régimes de houles à la côte et de la houle de projet. Utile pour la conception des ouvrages en mer ouverte (prise d'eau, canalisations d'amenée) et à l'échelle d'une zone homogène (baie, golfe). Nécessaire pour déterminer et organiser les travaux de pose	50 000 € HT
Bathymétrie*	Relevé bathymétrique par échosondeur mono ou multi faisceaux. Relevé utile pour la recherche d'un tracé de conduite et le positionnement d'une prise d'eau. En fonction de la connaissance du site, le relevé bathymétrique peut porter sur une surface plus ou moins grande ou une « bande » dans laquelle sera construite la conduite.	5 000 € HT pour 1ha
Morphologie Nature des fonds*	Enregistrement en continu d'images de la surface des fonds, au moyen d'un sonar à balayage latéral. Couvre assez largement la zone d'étude pour le repérage des différents faciès du fond (roches, sable, vase, fonds mixtes) et le repérage des herbiers de posidonies (herbiers vivants, mattes mortes).	6 000 €HT pour 1 ha
Reconnaissance sismique*	Cette étude est nécessaire pour implanter le captage et la canalisation d'eau de mer	6 000 €HT pour 1 ha
Caractéristiques mécaniques des sols**	Une étude de sol en milieu marin peut être coûteuse et n'est pas toujours nécessaire car les ouvrages de captages sont posés sur le fonds marin et les canalisations sont lestées et auto stables.	10 à 50 k€HT fonction de la profondeur et de l'accessibilité du site
Profil de température des eaux de mer	Cette étude réalisée par une chaîne de thermistances est nécessaire pour optimiser la température de l'eau captée lorsque la zone possible d'implantation est étendue	5 000 à 10 000 € HT selon la durée des mesures : 6 mois d'été ou une année entière
Qualité des eaux et sédiments (pour les milieux fermés)	Mesures des paramètres physico-chimiques de l'eau (3 stations) et des sédiments (3 échantillons) pour connaître l'état initial dans le milieu et les conséquences en exploitation	6 000 € HT
Modélisation des impacts thermiques	Mesure des directions et vitesses des courants (1 mois de mesures) Modélisation et simulation des impacts thermiques en fonction de données et débit	20 à 40 000 € HT 12 0000 à 20 000 € HT
Inventaire des écosystèmes	Etudes des habitats, inventaires des espèces faunes et flores, cartographies	2 500 à 40 000 € HT suivant scénarios
Dossier administratif	Inclus une notice ou étude d'impact ou le document d'incidence sur l'eau	15 000 à 30 000 € HT. très variable suivant les effets cumulés, la taille et la localisation du projet.

- : 1 seule et même mission géophysique permet d'acquérir ces informations
- ** : ne peut être réalisé qu'à l'issue de la mission géophysique et doit intégrer le géophysicien responsable de la mission *

3.3.2 Conception des ouvrages maritimes

3.3.2.1 Implantation des captages et rejets d'eau de mer

Les zones de forts marnages ou là où la mer peut être agitée doivent être traitées avec attention afin de s'assurer que le niveau d'eau aux aspirations et rejet sera toujours suffisant et que les vagues ne risqueront pas d'endommager les ouvrages et assurer une hauteur suffisante pour permettre le fonctionnement des pompes eau de mer.

On différencie typiquement 3 différents profils de zones de captage :

- les ports
 - L'émissaire de captage y est installé en porte-à-faux,
 - coût de génie civil généralement faible;
- les fonds sableux :
 - l'émissaire de captage est enterré dans le sable (afin d'éviter les ancrages et les baigneurs),
 - coût de génie civil moyen ;
- les fonds rocheux
 - L'atterrage de l'émissaire de captage nécessite d'importants travaux de lestages et d'accroche sur la roche. Il est nécessaire de faire appel à une entreprise avec des bonnes références en travaux sous-marins, afin que le tuyau ne se désolidarise pas de la roche
 - coût de génie civil très variable généralement très élevé avec intervention d'entreprises spécialisées avec des références dans le domaine.

En plus du type de faciès géomorphologique la profondeur de puisage est un facteur de coût important. Le profil morphologique et la caractérisation des formations sous-marines supportant la pose de la canalisation conditionne la faisabilité et le coût de l'opération

3.3.2.2 Le captage d'eau de mer

La position du captage d'eau de mer (profondeur et distance en mer notamment) est déterminante pour obtenir la meilleure performance énergétique de la PAC sur eau de mer.

Si la PAC est dimensionnée sur les besoins de froid notamment, il faudra que la température de l'eau de mer prélevée permette une élévation de 5 à 6°C correspondant à l'écart de température de fonctionnement des groupes frigorifiques sans dépasser une température maximale de rejet de 30°C (réglementation Loi sur l'Eau).

Le graphique ci-dessous indique l'évolution de la température de l'eau de mer en fonction de la profondeur et du mois de l'année dans la rade de Villefranche/Mer. On peut voir qu'en été, la température peut atteindre plus de 26°C entre 5 à 10 m de profondeur. Si le captage est implanté dans cette zone, l'écart de température sur l'eau de mer en été sera de 3 à 4°C et non de 5 à 6°C, ce qui nécessitera de sur dimensionner l'installation de pompage d'eau de mer et entraînera une consommation accrue d'électricité en été.

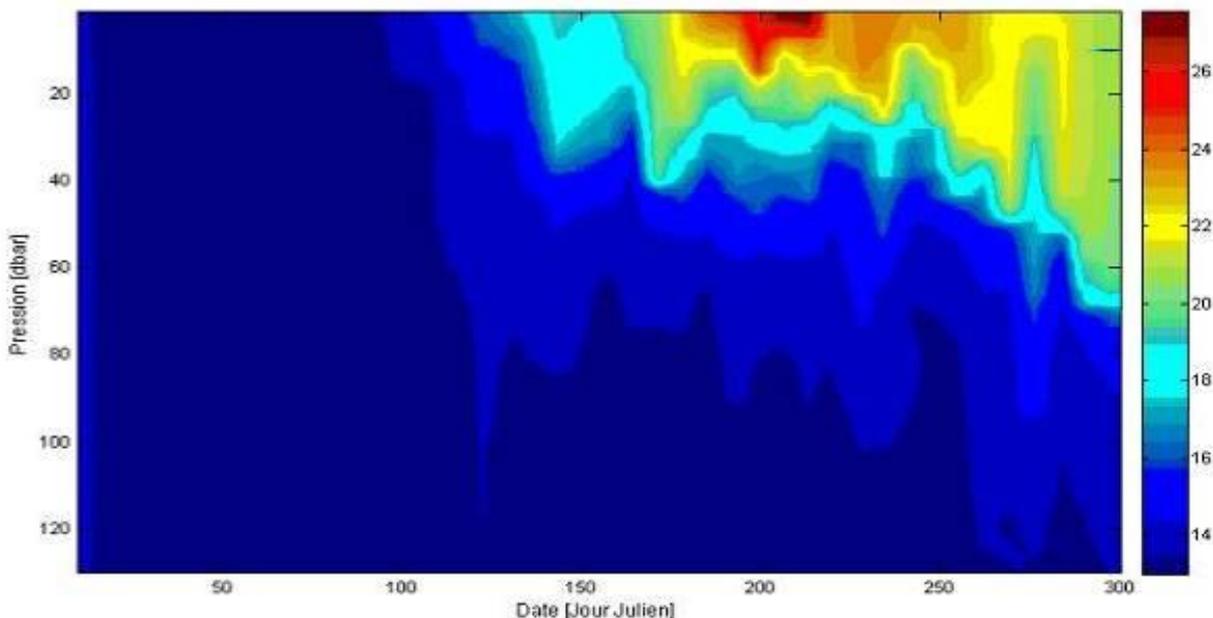


Figure 13 : Evolution des températures de l'eau de mer en fonction de la profondeur exprimée en dbar (équivalent au mètre) et de la période de l'année (source Observatoire Villefranche sur mer)

Il est donc nécessaire d'implanter le captage dans une couche d'eau de mer qui reste froide toute l'année, en particulier en été, c'est-à-dire idéalement en-dessous de la thermocline (niveau de la mer en-dessous duquel la température de l'eau de mer reste constante quelle que soit la période de la journée). En Méditerranée, la température de l'eau en-dessous de 60 m est toujours constante et de l'ordre de 13°C.

Toutefois, le coût des travaux maritimes en-dessous du seuil de 60 m est extrêmement élevé (zone de travaux off-shore) ; des captages ont été réalisés à cette profondeur pour alimenter en eau fraîche des bassins d'aquarium à Monaco.

Les captages sont souvent implantés à une profondeur minimale de quelques mètres. La recherche d'une eau de mer froide nécessite une campagne de mesures et peut générer des coûts de génie civil élevés : il est donc nécessaire d'optimiser l'équation température de l'eau de mer/coût du captage. Il est souvent nécessaire de réaliser une campagne de mesures pour déterminer le profil annuel des températures de la zone où il est prévu d'implanter un captage.

Si la PAC est dimensionnée sur les besoins de chaud, le captage peut être implanté dans une zone plus proche du rivage, puisque dans ce cas il y a diminution de la température de l'eau de mer rejetée et non pas élévation.

Le captage de l'eau de mer peut être réalisé :

- Soit en pleine mer, à une distance du rivage qui permet d'obtenir une température d'eau constante et froide (pour les installations dimensionnées sur les besoins de froid), et d'éviter l'aspiration d'algues et de détritux,
- Soit dans un port: dans ce cas, la position du captage doit tenir compte des ouvrages de captage et de rejet existants.

3.3.2.2.1 Crépine béton sur fond marin

Dans ce cas, une crépine béton est préfabriquée et posée sur le fond et raccordée à la canalisation. L'ensemble est ancré dans le fond avec des moyens adaptés.

L'intérieur peut être en forme d'entonnoir afin d'homogénéiser les vitesses sur la surface de la crépine (absence de passage préférentiel). La crépine peut être réalisée de façon à créer un récif artificiel d'habitat pour la faune et la flore marine.

Un barreaudage peut être suffisant pour éviter l'aspiration de gros corps étrangers.

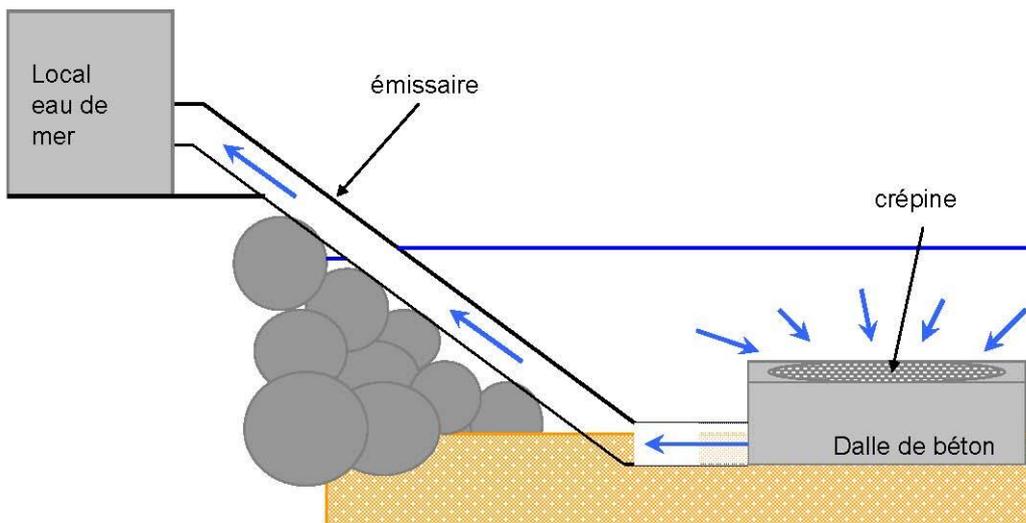


Figure 14 Schéma de crépine béton (Source Dalkia-Veolia)



Des filtres peuvent aussi être installés directement à l'aspiration. Cela simplifie les moyens de filtrations suivants mais impose une vitesse de passage extrêmement faible et des matériaux qui vont limiter la prolifération des mollusques et algues. Un système de chasse d'air permet le décolmatage du filtre en fonction de la perte de charge ou suivant une horloge.

Figure 15 Filtre aspiration en cupro Nickel (Source EIMCO)

3.3.2.2.2 Aspiration sous lit de sable

Lorsque le fond marin est du sable, il est possible d'enfouir la canalisation de prise dans le sable. Celui-ci pourra jouer le rôle de filtre à haute efficacité. La mise en place d'un géotextile peut permettre une excellente filtration mais génère une perte de charge additionnelle.

Cette solution attrayante a priori demande des analyses particulières dans la mise en œuvre. En effet, outre les difficultés éventuelles

d'enfouissement à une profondeur d'eau qui permettra de toujours assurer une hauteur suffisante pour l'aspiration des pompes, il faut étudier la perte de charge dans le lit de sable. L'évolution dans le temps des masses de sable doit être envisagée dès les études préliminaires.

Cas extrême centrale de Bahreïn Bay – Dalkia utilities Bahreïn. Cette centrale de froid est dimensionnée pour 150 MW avec deux tubes d'aspiration implantés de diamètre 6 300 mm en PVC rainuré (Bleu) et un rejet en 500 mm (beige). L'ensemble est installé sous un lit de graviers géotextile et de sable. L'installation a nécessité la mise en place d'un cofferdam de sable pour dégager une zone de chantier de 20*700 mètres où les engins ont pu travailler. Des études particulières ont permis de déterminer la granulométrie des différentes couches, la qualité du géotextile et les mouvements de mer qui pourraient modifier l'ensemble.



Figure 16 : Prise eau de mer Bahrein, Tubes d'aspiration en UPVC 630 mm (Source Dalkia utilities-Bahrein)

Il existe des systèmes de retenue du sable de plage par aspiration d'eau. Ce principe peut être intéressant mais doit confirmer sa capacité à fournir de l'eau de mer dans toutes les conditions de marée et de météo. A défaut, l'usage de stockage thermique sera une solution pour assurer le service de fourniture d'énergie.

3.3.2.2.3 Tube en applique de Quai

Un tube est plongé verticalement dans le port. Une crépine est fixée en base à un niveau d'immersion propre à prévenir les encrassements liés aux mouvements d'eau du fond de port et les désamorçages dus à la marée. Le tube devra aussi être protégé des mouvements des navires et des éventuels autres rejets ou captage d'eau.

Cas de Cherbourg Divette :

Le tube est protégé par le quai dans lequel il est implanté. Il circule et est accroché dessous. La crépine est ici un tambour rotatif. Une pompe eau de mer secondaire alimente un jeu de buses dans la crépine dont la projection d'eau sous pression permet la rotation du tambour et le contra lavage du filtre.



Figure 17 : implantation captage Cherbourg (source Actu Environnement)



Figure 18 : Implantation captage EDM Cherbourg Divette (source Actu Environnement)

3.3.2.2.4 Prévention des encrassements

Le brassage de l'eau entraînent une grande quantité de matière. Sédimentaire ou vivante, elle peut colmater les systèmes de filtres et être propice au développement d'algues et mollusque qui peuvent perturber les écoulements dans les canalisations et échangeurs, réduire la performance des systèmes thermiques.

Il faut noter que si l'entraînement des solides peut être limité par la vitesse de circulation et la mise en place de pots de décantation, le développement du vivant est systématique mais très irrégulier et difficile à appréhender.

Certains sites présentent de grandes proliférations de balanes là où d'autres n'ont jamais vu que quelques moules au bout de quelques années. La nature de l'eau aspirée est certainement un facteur déterminant. L'eau turbide aspirée directement dans bassin fermé d'un port de pêche est plus riche en nourriture pour ces mollusques que l'eau filtrée à travers le lit de sable d'une plage.

Pour prévenir ces risques, de nombreuses solutions peuvent être envisagées à travers deux options :

Soit prévenir l'encrassement par une filtration très fine, au risque d'avoir des difficultés de colmatage gestion des filtres :

Mise en place de filtration très fine 100 puis 20 microns (Voir exemple SATMAR à port Leucate)

Soit en se contentant de mettre en place une filtration intermédiaire (supérieure à 1 mm) au risque d'encrasser les échangeurs.

Les deux options sont possibles et aucune ne se dégage. Les fabricants d'échangeurs recommandent des filtrations de l'ordre de 500 microns, mais cette dimension n'empêche pas le développement de mollusques dans les échangeurs.

Une analyse de la qualité d'eau, spécialement du point de vu des nutriments pour le vivant peut permettre de sélectionner le bon système de

filtration suivant les options ci-dessus.

- Pour limiter le colmatage par les solides
 - Conserver des sections de passage importantes, spécialement au niveau du dégrillage en mer.
 - Limiter les vitesses de passage aux réductions de section des filtres
 - Sur dimensionner les filtres eau de mer et conserver des sections de passage adaptées en s'assurant de la compatibilité du maillage avec les encrassants
 - Prévoir des échangeurs avec de forts coefficients d'encrassement et des sections de passage raisonnables
- Pour limiter la prolifération du vivant :
 - Mettre des peintures anti fouling pour prévenir les proliférations du vivant (renouvellement annuel et complexité de mise en œuvre)
 - Prévoir des chocs thermiques dans les échangeurs pour tuer les proliférations de mollusques, on considère qu'une élévation temporaire de température à 41°C va tuer tous les mollusques. Ce choc doit être effectué en circuit fermé et refroidi avant rejet dans le milieu. Il faut aussi prendre en compte que tous les mollusques mort vont se décrocher et risquer de venir colmater les filtres.
 - Injection de biocides dans la canalisation d'eau de mer, cette solution nécessite d'analyser l'impact sur l'environnement et d'être déclaré dans le dossier administratif. La neutralisation des matières actives avant la sortie peut être exigée.
 - Ionisation de cuivre
 - Dioxyde de chlore
 - Eau de javel
 - Autre produit

Les solutions à émission d'ions métalliques, utilisée dans les sous-marins et milieu offshore semblent prometteuses en efficacité et faibles en impact, mais aucune application « petite » thermique terrestre n'a été identifiée.

Quelle que soit la solution retenue, sauf pour des projets de très grande ampleur ou des installations parfaitement adaptées (pompes dédiées avec moyens de lavage), on évitera tous les systèmes mécaniques immergés qui risqueront d'être sujets à des pannes récurrentes et nécessiteront des moyens coûteux spécifiques pour intervenir en dépannage.

3.3.2.3 Rejet d'eau de mer

Le rejet d'eau de mer doit être conçu pour minimiser l'impact du panache thermique sur le milieu marin.

Le rejet d'eau de mer peut se faire soit en pleine mer (milieu ouvert), soit dans un port (milieu fermé). L'implantation du rejet d'eau de mer doit en effet éviter de générer un impact même limité sur la faune et la flore. Il sera nécessaire d'exclure par exemple tout rejet dans une zone sensible et protégée comme une prairie de Posidonies.

Afin de faciliter le pré-dimensionnement du rejet d'eau chaude dans le milieu marin, la simulation de dispersion de panaches thermiques doit être mise en œuvre. De nombreux outils de simulation peuvent être utilisés dont Visual plume, outil de modélisation sous Windows (jusqu'en 2000) en free ware. Il existe d'autres logiciels tels que CELIMAC 3D, fluidyn-FLOWCOAST... Les résultats des simulations menées permettent de :

- déterminer la meilleure implantation de l'ouvrage de rejets
- estimer rapidement l'impact du rejet modélisé en termes de différences de température en fonction de la distance au point de rejet et de la profondeur de ce dernier.
- pouvoir répondre aux questions des autorités administratives et anticiper les questions des parties prenantes.

Les zones de captages et de rejets doivent être éloignées d'une distance suffisante afin de ne pas ré aspirer l'eau rejetée. Une distance de plusieurs dizaines de mètres est recommandée. Elle dépend de la configuration locale, des courants et ne peut être fixée a priori.

A Monaco, la plupart des rejets en pleine mer s'effectuent directement à l'air libre, au niveau des enrochements. Les caractérisations et modélisations réalisées sur les différents sites dans les différents cas montrent que les dilutions du panache thermique (chaud ou froid) sont rapides et que l'impact sur le milieu est considéré comme nul.

Dans le cas d'un rejet en milieu confiné (port), il n'est pas possible de modéliser le panache thermique avec Visual Plume : il sera nécessaire d'utiliser un modèle 3D qui tienne compte des autres installations existantes.

Lorsque la PAC sur eau de mer est implantée dans un port, il est parfois nécessaire d'envisager d'autres solutions que le captage et le rejet dans le port pour éviter d'augmenter l'eutrophisation de l'eau du port :

- Captage dans le port et rejet à l'extérieur,
- Captage à l'extérieur du port et rejet à l'intérieur.

La mise en place d'une PAC-EM dans un port peut en effet créer un brassage de l'eau de mer qui réduira le phénomène d'eutrophisation.

3.3.2.4 Canalisations sous-marines

Deux types de tuyaux sont couramment utilisés pour le captage en mer :

- Polyéthylène :
 - souple et flexible, il s'adapte aux reliefs et obstacles des fonds marins
 - flottant, il a tendance à se déformer dès qu'il n'est pas suffisamment lesté et atterré
- Bonna (technologie française) cylindre d'acier enrobé de béton, il ne flotte pas.
 - L'enrobage de béton est dimensionné sur-mesure, selon la topologie du fond marin et selon les besoins de lestage
 - Non-flexible

- UPVC :
 - Rigide, il permet d'être usiné facilement
 - Densité de 1.44 kg/l il coule plein d'eau et limite la contrainte de lestage.

Il est commun d'utiliser le polyéthylène pour les plus faibles débits (jusqu'à 300-400 m³/h) et le Bonna pour les débits supérieurs. Le choix dépend aussi du relief et de la nature du fond marin.

Le polyéthylène semble avoir une meilleure résistance aux proliférations du vivant en limitant la facilité d'accrochage.



Figure 19 : pose canalisation de rejet (source Ville de La Seyne/mer)

3.3.2.5 Budget ouvrages maritimes

La prise eau de mer et l'atterrage de l'émissaire représente un investissement entre 100 k€ et 800 k€.

Ce coût varie selon la longueur et le diamètre de l'émissaire, mais surtout selon la nature du fond marin. Cette fourchette de prix concerne des profondeurs de captage inférieures à 20 m, au-delà l'investissement augmente de façon exponentielle.

3.4 Conception des équipements dans le local eau de mer

Les équipements de la boucle eau de mer sont généralement implantés dans un local spécifique situé le plus près possible de la mer qui comporte :

- Un bassin de réception et de stockage de l'eau de mer,
- Les pompes eau de mer,
- Les filtres et préfiltres,

Les échangeurs eau de mer/eau douce.

Ce local ne doit pas être commun avec les PAC pour éviter les risques d'inondation et de corrosion. Il sera de préférence séparé de tout autre local.

Il peut être sous le niveau de la mer, mais doit alors prévoir des moyens de prévention/alerte inondation, les échappées réglementaires, portes étanches ...

3.4.1 Pompes eau de mer

Elles peuvent être immergées ou intégrées dans le local eau de mer. Les pompes doivent être compatibles avec un usage eau de mer, l'installation doit permettre une maintenance aisée.

Des variateurs de vitesse sont indispensables pour l'optimisation énergétique. Le dimensionnement sera réalisé en cohérence avec l'ensemble de l'installation. Le tableau électrique, variateur et système de commande des pompes sera placé dans un local séparé et indépendant des « locaux humides ».

3.4.1.1 Pompes immergées

L'amorçage est garanti, la maintenance nécessite des compétences et des moyens de manutention adaptés. Un remplacement de la pompe doit être envisagé au bout de quelques années. Elles peuvent être placées directement dans le tube collecteur permettant ainsi un gain de place sensible.

3.4.1.2 Pompes en local séparé

L'installation dans un local spécifique présente l'avantage de faciliter la maintenance. Si celui-ci est sous le niveau de la mer, cela garantit l'amorçage des pompes à condition d'éviter les cols de cygne. Un système de double vannage est recommandé entre l'atterrage et la pompe pour garantir l'étanchéité lors des interventions de maintenance.

A défaut, un système d'amorçage, par ou des pompes à vide par exemple, ou des pompes auto amorçantes, seront nécessaires et demanderont de la maintenance spécifique.

3.4.2 Filtration

La chaîne de filtration et traitement de l'eau de mer est un élément clé de la réussite et l'efficacité dans la durée d'un projet. Elle doit être adaptée en fonction des conditions locales et de leurs éventuelles variations saisonnières.

Une diminution d'efficacité notable peut rapidement être constatée suite :

- à des colmatages de filtre, par les algues, MES, développement de mollusques
- à des encrassements d'échangeur, soit suite à des développements de bactéries sur la surface d'échange qui fixe les MES, soit des développements de mollusques sur les plaques.

Cela peut détruire très rapidement les performances en augmentant les consommations électriques par les effets combinés des pertes de charges, la nécessité d'augmenter les débits (augmentation des coûts de pompage) et les dégradations des différents étages de température (pertes de Cop machine).

Les meilleures techniques disponibles consistent à réduire l'encrassement et la corrosion grâce à une conception adaptée du système, ce qui diminue le besoin de conditionner l'eau de refroidissement. Dans les systèmes à une passe, la solution consiste à éviter les zones stagnantes et les turbulences et à maintenir une vitesse d'eau minimale (0,8 [m/s] pour les échangeurs de chaleur, 1,5 [m/s] pour les condenseurs). Ces vitesses devront être adaptées avec les nécessités d'optimisation énergétique et les variations de vitesse des pompes. D'autres MTD consistent à fabriquer les systèmes à une passe fonctionnant dans un environnement très corrosif avec des matériaux comme du titane ou de l'acier inoxydable de haute qualité ou avec d'autres matériaux présentant des caractéristiques similaires.

Une grille de préfiltration au niveau de l'émissaire de captage constitue le premier niveau de filtration avec un diamètre de maillage d'un minimum 1 millimètre et de préférence quelques centimètres. Attention, une grille trop fine pourra se colmater très facilement avec du sable, des algues (voir chapitre sur le captage).

Une attention particulière devra être portée à l'entraînement des poissons. Les observations ont montré qu'un maillage plus gros permet limiter le colmatage et la destruction de faune. Une vitesse de passage de l'eau inférieure 0,1-0,3 m/s a clairement permis d'obtenir un effet positif et la réduction de la quantité de poisson capturée.

En sortie d'émissaire, plusieurs solutions sont possibles pour filtrer l'eau de mer :

- L'eau déverse dans un bac de décantation (par gravité ou par pompage). Le sable, la vase et les grosses impuretés se déposent au fond du bac qu'il faudra prévoir de nettoyer en fonction des caractéristiques de l'eau pompée. Cette solution demande plus de surface mais laisse plus de choix et de souplesse pour la filtration. Elle est pompée dans le bac. Si l'émissaire est continuellement sous le niveau de la mer, le bac de décantation subit les variations de marée.
- Elle est directement envoyée dans le circuit.

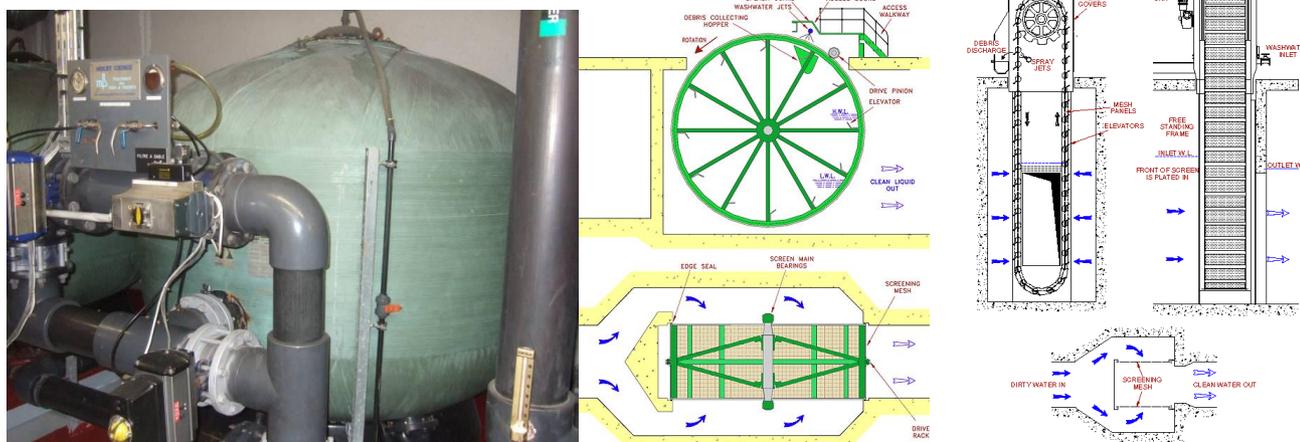
En amont de chaque pompe eau de mer est placé un filtre en inox afin de filtrer les impuretés et la biocénose de l'eau de mer aspirée. Suivant les systèmes de préfiltrations, le maillage sera adapté entre 5/10 et 10 mm.

En cas d'usage de bac de décantation, un système de filtre à bande ou à roue permet de gérer efficacement les risques de colmatage et autorise une filtration fine.

Type débit		Dégrillage	Filtration
Petit débit	<0.1 m3/s	Barreaudage	Filtre passif ou auto nettoyant rotatif ou sable
			Filtre passif à la prise
Débit intermédiaire	0.1-5 m3/s	Barreaudage	auto nettoyant rotatif, sable ou bande
Débits importants	>10 m3/sec	Barreaudage	Filtres à bande ou à rouleaux

Les filtres à sable sont une solution intéressante. La vitesse de l'eau dans le sable filtrant ne devant pas dépasser 50 m³/h/m², le volume des filtres à sable est toujours très conséquent et nécessite des locaux de grande surface. La filtration obtenue permet de prévenir une part importante de l'encrassement.

Figure 20 Filtre à sable, à rouleau et à bande (Sources Dalkia & EIMCO)



3.4.3 Echangeurs eau de mer/eau douce

Les échangeurs entre la boucle eau de mer et le circuit secondaire sont en titane. Ils représentent à eux seuls une grande partie du budget de l'installation PAC eau de mer. Les délais de fourniture sont importants (compter plusieurs mois). Leur dimensionnement devra être adapté. Il est primordial de limiter les écarts de température entre primaire et secondaire en se rappelant que chaque degré de température perdu est une dépense d'énergie sur l'ensemble de la vie de l'installation. A contrario, la très faible circulation d'eau dans les échangeurs peut être un terrain favorable au développement des mollusques.

3.4.4 Budgets investissement équipements eau de mer

- Pompes eau de mer et canalisation et prise

Le prix de base est équivalent à celui du réseau intermédiaire mais doit être majoré en fonction de la complexité de la pose.

Le poste global travaux maritimes réseau et équipement eau de mer est extrêmement variable et doit faire l'objet d'une étude particulière.

Le budget raisonnable minimal est supérieur à 100k€ et peut monter à plusieurs millions d'euros en fonction des puissances, des diamètres et situations.

- Echangeurs titane

A titre d'exemple, le budget pour des échangeurs à plaques en titane est de :

Pour 650 kW températures 12-7 / 5-10°C 7.5 k€

Pour 2600 kW températures 12-7 / 5-10°C 50 k€

- Coûts d'investissement moyens des réseaux intermédiaires pose facile

Diamètre de tuyau	Coût linéaire Indicatif
DN 300	400 €
DN 400	500 €
DN 500	650-700 €
DN 600	800-900 €
DN 700	1000-1100 €
DN 800	1200 – 1400 €

Le prix est dépendant de la localisation, la technologie, la quantité et la qualité de l'énergie et surtout le sol dans lequel la canalisation sera implantée. Le tableau ci-contre propose des coûts linéaires indicatifs de la boucle (tuyau + génie civil) selon les diamètres, donc les débits dans circuit de transfert pour des tuyaux en polyéthylène en zone faiblement urbanisée.

A noter que la boucle de transfert ne représente qu'une faible partie du coût d'investissement total d'une installation multi-clients (à la Seyne s/mer : 10% de l'investissement total).

- Coûts d'investissement moyens réseaux de chaleur

Le tableau ci-dessous reprend des valeurs dans le cadre d'obtention des subventions du Fonds Chaleur.

Il peut ainsi facilement être utilisé pour des études budgétaires.

Type de réseau	Diamètre Nominal du réseau	€/ml de tranchée
Basse pression (eau chaude)	DN 300 et plus	900
Basse pression (eau chaude)	DN 150 à DN 250	710
Basse pression (eau chaude)	DN 80 à DN125	520
Basse pression (eau chaude)	DN 65 et moins	450

4 IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES PAC SUR EAU DE MER

4.1 Généralités

Les PAC sur eau de mer sont considérées comme des équipements énergétiquement performants cependant :

- elles mettent en œuvre des fluides frigorigènes dont l'impact sur l'environnement ne doit pas être négligé
- elles consomment de l'électricité qui réduit la part d'énergie renouvelable et de récupération produite par la PAC et dont le contenu CO2 doit être pris en compte
- elles mobilisent la ressource maritime et il est indispensable de garantir un impact sur ce milieu aussi réduit que raisonnablement possible.

Il est donc important de connaître et maîtriser les impacts des PAC-EM sur l'environnement et de les faire connaître à l'ensemble des acteurs concernés et au public, afin d'anticiper les demandes et de fournir toutes les réponses aux questions qui pourraient se poser dans le cadre des démarches administratives nécessaires à la réalisation d'un projet.

4.1.1 Etude d'impact d'une PAC sur eau de mer

Les impacts sur le milieu marin doivent être évalués dans une étude d'impact :

- Etude d'impact si l'installation est soumise à autorisation dans le cadre de l'article L551-1 et suivants du Code de l'Environnement

(réglementation ICPE)

- Etude d'incidence sur l'eau si l'installation est seulement soumise à l'article L 214-1 et suivants du Code de l'Environnement (réglementation concernant le prélèvement des eaux superficielles ou souterraines).

Il sera nécessaire lors de la conception de minimiser ces impacts (utilisation d'une eau de mer plus fraîche en été, limitation de la température de rejet en mer en été, utilisation de diffuseurs pour réduire la vitesse du rejet de l'eau de mer). S'il est démontré que la PAC-EM génère des impacts sur le milieu marin, il sera nécessaire de mettre en œuvre des mesures compensatoires, par exemple la mise en place d'habitats artificiels au niveau des ouvrages de captage et rejet destinés à recréer de la biodiversité qui a été détruite par la PAC-EM

Le contenu type d'une étude devra être adapté en fonction des enjeux environnementaux liés aux impacts identifiés. Il comprend généralement la description de :

- Nature des fonds
- Qualité des eaux et des sédiments
- Mesure des courants
- Modélisation de la tâche thermique
- Identification des écosystèmes marins

L'étude d'impact pourra nécessiter :

- la cartographie initiale du milieu marin, avec réalisation éventuelle de mesures in situ pour établir un état zéro (cartographies des températures), cartographie de la houle,
- la modélisation du panache thermique avec un logiciel adapté (milieu ouvert ou milieu confiné),
- la définition des mesures compensatoires,
- etc.

Il est nécessaire de garder à l'esprit qu'une étude d'impact doit être réalisée en tenant compte du principe de proportionnalité : les moyens mis en œuvre pour la réaliser doivent être en adéquation avec les impacts d'une PAC eau de mer. Ce principe peut être évoqué lorsqu'un service instructeur exige pour la réalisation d'une étude d'impact des études ou des campagnes de mesures dont le contenu et le coût semblent disproportionnés par rapport aux enjeux. C'est dans ce cas au bureau d'études environnemental de conseiller le maître d'ouvrage sur le contenu de l'étude d'impact le plus approprié qui permette de concilier les demandes de l'administration et les contraintes financières du maître d'ouvrage.

Le temps d'élaboration d'une étude d'impact peut durer de 3 à 6 mois.

Projet OptimaPac :

C'est un projet de recherche intégré qui vise à structurer une vraie filière industrielle rassemblant des acteurs de la chaîne de valeur des pompes à chaleur eau de mer. L'objet du projet est l'optimisation des performances des PAC eau de mer dans leur globalité technique et environnementale, en tenant compte des effets potentiels sur le milieu marin et des conditions d'un développement favorable de cette énergie thermique marine. Les résultats du projet sont attendus courant 2014 avec notamment un outil d'aide au dimensionnement et à l'optimisation des PAC eau de mer en fonction des conditions d'environnement, après la parution de ce guide.

Le projet est fondé sur trois grandes actions complémentaires :

- la modélisation des panaches thermiques des PAC eau de mer existantes et des effets de dispersion dans le milieu marin, en intégrant les données hydrologiques et océanographiques
- l'étude de l'effet des PAC existantes sur les organismes et les communautés marines
- le développement de solutions technologiques efficaces adaptées à l'eau de mer, exploitant les résultats des points précédents et intégrant une offre de service jusqu'à l'utilisateur final.

4.1.2 Etude de suivi d'impact d'une PAC sur eau de mer

Il peut être demandé à l'exploitant de réaliser un suivi des impacts des rejets de la PAC-EM sur le milieu marin. Cette procédure est coûteuse et doit être réservée aux projets majeurs dans des zones présentant des sensibilités particulières. Ce suivi consiste à surveiller lors de relevés (une plongée par an) l'évolution de bio indicateurs (algues fixées, poissons) et du périmètre des herbiers de posidonies lorsqu'il en existe à proximité.

Pour les zones où les projets présentent un impact potentiel très modéré, un suivi des températures de rejet et une analyse régulière des qualités d'eau rejetées doivent assurer suffisamment de garanties.

Le budget d'une étude de suivi d'impact d'une PAC-EM peut varier de 15 à 20 k€ HT.

4.1.3 Budget Etude d'impact d'une PAC sur eau de mer

Le temps d'élaboration d'une étude d'impact peut durer de 3 à 6 mois, selon les études spécifiques à réaliser. Le budget total pour la réalisation d'une étude d'impact complète d'une PAC-EM (hors études spécifiques en cas de proximité de réserves naturelles ou zone Natura varie de 10 000 € à 80 000 € HT.

Ces montants et délais peuvent être réduits pour des projets de faible impact mobilisant de très faible quantité d'eau de mer dans des zones peu sensibles.

4.1.4 Planning Etude d'impact d'une PAC sur eau de mer

En fonction de la complexité du projet, la durée des études d'impact sera très variable.

Une modélisation de panache sera réalisée en quelques heures dans un environnement connu.

Les différentes étapes décrites ci-dessus pourront nécessiter plusieurs mois dans les cas les plus complexes. Elles seront constitutives du dossier administratif.

4.1.5 Grille d'analyse des impacts environnementaux des PAC sur eau de mer

Les principaux impacts d'une PAC-EM sur le milieu marin sont les suivants :

- Impact du chantier durant les travaux,
- Impact du passage du phytoplancton et du zooplancton par les installations de pompage,
- Impact du rejet d'eau de mer après passage par l'échangeur,
- Impact du nettoyage des filtres et préfiltres.

L'impact du panache thermique est très localisé car la dilution doit être rapide, notamment dans le cas d'un rejet en pleine mer. (Voir modélisation de rejets en milieu ouvert en annexe 2).

La grille d'analyse des impacts environnementaux (voir annexe 15) permet d'identifier les impacts potentiels d'un projet de PAC eau de mer, ce qui permet ensuite d'orienter le contenu de l'étude d'impact qui sera présentée aux autorités administratives.

Ouvrages	Milieu	Paramètres à prendre en compte									
		Houle / agitation	Bathymétrie et topographie	Morphologie	Nature des fonds	Niveau du substratum	Caractéristiques mécaniques des sols	Courants/Dispersion	Qualité eau et sédiments	Ecosystèmes marins	Usages maritimes
Point de pompage	→ ouvert	✓	✓	✓	✓			✓1	✓2	✓4	✓6
	→ Semi-ouvert	✓	✓	✓	✓			✓1	✓2	✓4	✓7
	→ confiné (port)				✓			✓1	✓2,3	✓5	✓7
Point de rejet	→ ouvert	✓	✓	✓	✓			✓1	✓2	✓4	✓6
	→ Semi-ouvert	✓	✓	✓	✓			✓1	✓2	✓4	✓7
	→ confiné (port)				✓			✓1	✓2,3	✓5	✓7
Canalisations	→ ouvert ou semi-ouvert	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓1	✓2	✓4	✓6

1. Modélisation de la tache thermique

2. Mesures des températures (recueil avant l'installation et suivi pendant l'exploitation au point de prélèvement et au point de rejet)

3. Mesures de la qualité physico-chimique des sédiments portuaires, si le pompage et/ou le rejet sont susceptibles de remettre en suspension les sédiments. Mesures des paramètres physico-chimiques de la colonne d'eau (température, salinité, O₂, nutriments et indicateurs d'eutrophisation).

4. Inventaire des différentes biocénoses et habitats sensibles : roches à algues photophiles, herbier de posidonies ou de zostères, coralligène, roches isolées ainsi que les espèces protégées (grande nacre, corail rouge, mérour...).

5. Inventaire de la faune fixée des digues, quais et fonds (généralement envasés).

6. Usages : pêche professionnelle et amateur, navigation de plaisance, cultures marines, baignade, plongée, autres prélèvements d'eau et rejets.

7. Usages selon les cas : activités de plaisance principalement

5 INTERFACES ET CONTRAINTES REGLEMENTAIRES ET ADMINISTRATIVES

5.1 Rôles et Compétences des différents acteurs

5.1.1 Les services instructeurs de l'Etat

Les démarches administratives applicables dépendront des services instructeurs :

- Pour les systèmes qui font l'objet d'une Installation Classée pour la Protection de l'Environnement (ICPE) du fait de l'usage de fluide frigorigène fluoré (ICPE 1185 si cumul fluide > 300 kg) ou ammoniac (ICPE 1136 si cumul > 50kg), c'est la DREAL qui instruira le dossier, en consultant les autres services administratifs concernés (MISE, DDE, arrondissement maritime, etc.),
- Lorsque l'installation est régie par les articles L. 214-1 et suivants du code de l'environnement (boucle eau de mer ou intermédiaire qui alimente des PAC distribuées), c'est la MISE, la DDE, ou l'arrondissement maritime (à déterminer suivant l'implantation du projet) qui instruira le dossier.

Une demande devra aussi être adressée via la Préfecture au gestionnaire du domaine maritime pour obtenir l'Autorisation d'Occupation

Temporaire du domaine maritime nécessaire à la réalisation du projet.

5.1.2 Bureau d'étude milieu maritime (conception des ouvrages)

Le bureau d'étude en milieu maritime réalise l'étude d'impact et/ou le dossier de demande d'Autorisation d'Exploiter suivant le cas de figure rencontré, ainsi que les études spécifiques à mener. Il doit être un spécialiste du milieu marin (voir liste en annexe) et possède parfois des compétences spécifiques pour concevoir les ouvrages sous-marins de captage et de rejet d'eau de mer.

5.1.3 Société de travaux maritimes

La société de travaux maritimes (et sous-marins) intervient à deux niveaux lors du projet :

- Elle participe à la décision de la faisabilité d'un captage eau de mer à proximité de l'installation thermo-frigorifique, au moyen d'une première plongée, d'un coût de 2 à 5 k€ (supérieur si la zone de captage est à plus de 12 mètres de profondeur, les plongeurs devant effectuer des paliers de pression)
- Lorsque la décision de construire est accordée, la société de travaux marins construit alors l'infrastructure sous-marine de captage : l'atterrage de l'émissaire ainsi qu'éventuellement la construction d'une dalle de béton supportant la crépine.

5.1.4 Bureau d'études thermiques

Le bureau d'études thermiques assure une Assistance à Maître d'Ouvrage ou réalise la maîtrise d'œuvre de l'installation de PAC-EM pour le maître d'ouvrage qui peut être un établissement privé, une collectivité ou une société de services.

5.1.5 Société de maintenance en milieu maritime

Les sociétés de maintenance en milieu maritime assurent la maintenance régulière des émissaires de captages et de rejets. Ce sont des sociétés qui disposent de plongeurs formés et habilités pour les travaux concernés.

5.2 Textes réglementaires

5.2.1 Prélèvement et Rejet en mer

Une réglementation française liée aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) limite la température de rejet des installations

- L'arrêté du 02/02/1998 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation. L'article 31 relatif à la pollution des eaux superficielles indique que « la température des effluents rejetés est inférieure à 30°C ».

Les rejets de chaleur dans le milieu naturel (mer ou rivière) constituent une pollution et sont soumis à une taxe. L'assiette de la redevance est la pollution annuelle rejetée par toute entreprise au milieu naturel et porte sur 10 éléments constitutifs de la pollution dont la chaleur. Article L 213-10-2 du Code de l'environnement, dont les modalités sont décrites dans la circulaire du 24 octobre 2008.

5.2.2 Eau chaude sanitaire

La température de production et distribution d'eau chaude sanitaire collective est encadrée entre autres par les arrêtés du 30 novembre 2005 et du 1er février 2010 et la Circulaire DGS/EA4 no 2010-448 du 21 décembre 2010. Il y est spécifié qu'il faut contrôler :

- La sortie de la production d'ECS (mise en distribution) : l'objectif de la mesure de la température de l'ECS est le contrôle du respect des valeurs minimales exigées par la réglementation (arrêté du 30 novembre 2005) : la mise en distribution d'une eau de température suffisamment élevée et supérieure à 55°C.
- La température de retour de boucle et de chacune des branches de ce retour d'ECS doivent être supérieures ou égales à la température relevée au niveau du collecteur de retour (dans le local technique de production d'ECS), qui doit être supérieure à 50°C.

5.2.3 Installation avec fluides frigorigènes

La réglementation concernant les machines de production de froid évolue régulièrement. Précédemment concerné par la rubrique ICPE 2920 qui ne s'applique qu'aux installations d'énorme puissance, les installations contenant des gaz frigorigènes fluorés sont maintenant concernées par la rubrique 1185 si le contenu total de l'installation dépasse 300kg. Pour les installations fonctionnant à l'ammoniac, elles sont concernées par la rubrique 1136 dès qu'elles contiennent plus de 50kg de NH3.

Il faut noter que les fluides sont en pleine évolution afin de réduire l'impact environnemental des installations fuyardes. Les fluides sont

caractérisés par leur GWP (équivalent CO2) en kg équivalent CO2 par kg de fluide. Il est important de considérer qu'une installation correctement conçue et maintenue ne doit pas fuir et donc que le GWP ne peut être le seul critère de décision. Il est important de faire une analyse sur l'ensemble de la durée de vie de l'installation et caractériser le TEWI qui prend en compte les émissions liées à la production électrique.

5.2.4 Budgets dossiers réglementaires

Les budgets pour la réalisation des dossiers réglementaires (incluant l'étude d'impact ou le document d'incidence sur l'eau) sont les suivants :

- Dossier de demande d'autorisation d'exploiter : 20000 à 30000 €HT ;
- Dossier de déclaration : 15000 €HT.

Les textes réglementaires du Code de l'Environnement qui peuvent concerner une installation de PAC-EM sont les suivants :

- articles L214-1 et suivants (Loi sur l'Eau) concernant les rejets et les prélèvements sur le milieu aquatique ; suivant le débit d'eau de mer utilisée et le montant des ouvrages en contact avec le milieu marin, les ouvrages de captage/rejet sont soumis à déclaration ou à autorisation ;
- articles L511-1 et suivants concernant les impacts des ICPE (centrales thermo-frigorifiques)
- article L122-1 concernant la démocratisation des enquêtes publiques, qui impose notamment la réalisation d'études d'impact pour les installations de rejets et les prélèvements sur le milieu aquatique, qui ne sont soumis qu'à la réalisation d'une notice d'incidence sur le milieu aquatique dans le cadre des articles L214-1 et suivants,
- article L123-1 concernant la réalisation des enquêtes publiques.

Puisqu'une partie de ses ouvrages occupera le Domaine Public Maritime (DPM) dans les ports ou à l'extérieur des ports, l'installation d'une PAC-EM nécessitera d'obtenir une Autorisation d'Occupation Temporaire (AOT) ou une concession d'utilisation de ce DPM.

Par ailleurs, selon la proximité de la PAC-EM avec une zone NATURA 2000, une réserve naturelle, un site classé ou inscrit, un monument historique, une ZPPAUP (Zone de Protection du Patrimoine Architectural Urbain et Paysager), des études d'impacts complémentaires seront à mener et des dispositions réglementaires spécifiques à appliquer.

Enfin, il sera nécessaire de prévoir un diagnostic archéologique avant le démarrage des travaux dans les zones propices à la conservation des vestiges archéologiques.

Pour une PAC-EM centralisée, la réglementation L511-1 (ICPE) prévaudra, mais l'étude d'impact devra aborder en détail les impacts sur le milieu marin (réglementation L214-1).

5.2.5 Planning dossiers réglementaires

La durée de rédaction et validation des dossiers réglementaires sera extrêmement variable en fonction de la typologie du projet.

Si l'installation de groupe froid ou pompe à chaleur nécessite une classification ICPE 1185, il s'agit d'un dossier de déclaration d'enregistrement dont la réalisation est inférieure à 6 mois.

Les études environnementales et maritimes seront extrêmement variables suivant les situations. Les délais seront variables entre trois et douze mois suivant les coordinations inter-services nécessaires.

Ces aspects doivent être envisagés dès les phases préliminaires du projet.

6 Analyse et description des retours d'expériences

6.1 Facteurs clés de la réussite d'un projet

6.1.1 Typologies des projets

Divers points de vigilance ont été identifiés, principalement génériques aux installations de PAC plus qu'à la spécificité eau de mer :

Il faut souligner ici le rôle des sociétés spécialisées en exploitation conception et exploitation de ces systèmes qui permettent d'éviter les écueils des installations eau de mer et savent appréhender les PAC et la gestion des systèmes de distribution/réseau de chaleur.

Plusieurs points viennent handicaper certaines installations :

Développement de projet : le séquençage du projet est souvent ambitieux et peu en lien avec la réalité. Il est important d'avoir une vision objective de celui-ci pour obtenir la rentabilité attendue

Filtration : souvent trop fine, voire sophistiquée, elle se colmate trop rapidement et perturbe l'exploitation.

Fonctionnement des auxiliaires, régulation et mise au point des systèmes : Cet aspect est souvent mal pris en compte dans la phase étude. Les auxiliaires ne doivent être en fonctionnement qu'au minimum efficace et nécessaire. Le COP_{TotalUtile} de l'installation sera très sensible à des vannes fuyardes, des pompes en marche en surnombre ou à un régime trop élevé.

La durée de vie projetée de l'ensemble est un point délicat à aborder dès les phases préliminaires. Les systèmes eau de mer sont exposés à des contraintes d'érosion, de corrosion liés à l'eau et aux éléments qu'il est indispensable de parfaitement appréhender. Le choix de chaque composant sera fait pour répondre aux objectifs soit en privilégiant des équipements aux plus longues durées de vie, soit en programmant des remplacements sur la période. Les ouvrages de distribution en bâtiments sont généralement conçus pour la durée de vie du bâtiment. Les réseaux de chaleur ont des durées de vie supérieures à 30 ans.

Les ouvrages immergés sont des équipements majeurs, généralement statiques, sur lesquels il est préférable de limiter les interventions (remplacement de grilles, inspections...). Leur bonne conception et réalisation doit permettre d'envisager des durées de vie supérieures à 20, 30 ans ou plus. Le choix et la mise en œuvre des matériaux, spécialement des bétons devront être particulièrement soignés pour répondre aux objectifs ambitieux.

Les points clés à maîtriser pour la réussite d'un projet sont les suivants :

- Conception :
 - Taille de l'installation : les PAC-EM étant pénalisées par le coût significatif des ouvrages sous-marins, il est préférable de s'orienter vers des projets d'une puissance minimale de 1 MWf ; sauf accès aisé à la mer grâce par exemple à un captage pré existant.
 - Dimensionnement de l'installation : les groupes frigorifiques seront sélectionnés de façon à obtenir la meilleure performance énergétique quel que soit le niveau de charge en chaud et en froid au cours de l'année. Vitesse variable, séquençage des puissances peuvent être des solutions.
 - Régime d'eau des terminaux :
 - Eau chaude aussi bas que possible 45°C/40°C à 50/45°C
 - Eau glacée/rafraîchie 7°C/12°C voire 15°C/20°C pour favoriser le free-chilling
 - Absence de régulation en vanne 3 voies
 - Implantation du captage et du rejet d'eau de mer :
 - le captage doit être implanté de façon à obtenir une eau de mer à la température la plus adéquate pour couvrir les besoins avec la meilleure performance énergétique (la plus chaude lorsque les besoins de chaleur sont prédominants, plutôt froide lorsque les besoins de froid sont prédominants),
 - le rejet doit être implanté de façon à minimiser les impacts sur l'environnement ;
 - cette implantation devra être réalisée avec le concours d'un bureau d'étude spécialisé dans le milieu marin
 - Configuration de l'installation : les solutions centralisées, si elles augmentent les pertes thermiques assurent une meilleure garantie de performance que les systèmes décentralisés.
- Exploitation
 - Système de suivi des performances
 - Equilibrage des réseaux de distribution
 - Tenue des deltas T
 - Maintenance
 - Nettoyage des échangeurs et filtres

6.1.2 Coût d'investissements

Le coût moyen d'installation en fonction des puissances est variable selon les solutions retenues.

Une boucle de transfert peut paraître moins chère si on ne considère pas les systèmes de productions décentralisées.

Le coût d'investissement moyen le plus bas est obtenu pour le projet qui concerne une installation centralisée (le coût des réseaux eau chaude et eau glacée est inclus) de taille importante : les ouvrages de génie civil pour le captage et le rejet d'eau de mer sont plus facilement amortis pour des installations de taille significative.

Par rapport à une solution boucle de transfert + productions décentralisées, les avantages de cette solution sont les suivants :

- Utilisation de groupes frigorifiques plus puissants, plus performants et moins coûteux en prix moyen,
- Local technique unique de taille réduite comparé à plusieurs locaux techniques (un par bâtiment),
- Meilleure fiabilité de fonctionnement et gestion de la performance.

Le prix usuel minimal pour des machines travaillant au-delà de 60°C est supérieur à 200 € par kW installé mais peut être très supérieur en sélectionnant des machines industrielles hautes performances. Celles-ci bien que plus chères peuvent être rentables sur la durée, offrir une mise au point plus aisée et limiter les risques de fuites de fluide frigorigène.

6.1.3 Coût de maintenance

Les opérations de maintenance spécifiques aux PAC-EM détaillées concernent la boucle eau de mer et la boucle d'eau douce :

- Nettoyage des crépines de captage par des plongeurs,
- Maintenance des pompes eau de mer,
- Maintenance des filtres et échangeurs eau de mer,
- Maintenance de la boucle eau douce.

Les opérations de maintenance concernant la production thermo-frigorifique ne sont pas spécifiques aux PAC eau de mer.

Le budget maintenance installation eau de mer est lié à l'implantation et à la conception. L'adéquation milieu filtre conditionne les cycles de maintenance. Certaines installations peuvent nécessiter des fréquences de nettoyages des filtres et échangeurs très supérieures à l'estimation

initiale.

6.1.4 Coût global

Le comparatif en coût global avec une solution standard gaz met en évidence :

- un surcoût d'investissement de la solution PAC-EM qui est partiellement compensé par une économie de coût énergétique qui peut atteindre 30%, les coûts d'exploitation P2 P3 étant proches,
- un bilan environnemental nettement en faveur de la solution PAC-EM avec une réduction des émissions de CO2 qui peuvent être largement supérieures à 50%.

Les coûts P1 P2 P3 sont plus élevés pour les solutions décentralisées avec boucle de transfert ; ce qui rend la solution production centralisée plus performante en coût global.

Les effets d'échelle favorisent notablement tous les ratios sur les grosses installations, investissements/puissance installée et investissements/Energies utiles livrées. De plus, les performances γ sont meilleures du fait de la mise en œuvre de machines plus performantes et de moyens de suivis plus importants.

De plus, elles peuvent facilement être raccordées à des réseaux de chaleur et faire bénéficier les utilisateurs d'une TVA à taux réduit.

6.2 Retour d'expérience : production Réseau de chaleur Scandinave

6.2.1 Description succincte

Réseau de chaleur et de froid de Stockholm, Suède.

Ce réseau de chaleur et de froid de 750 km produit 5700 GWh de chaleur par an. En l'absence de réseau de distribution de gaz développé, il couvre 60% du besoin de chaleur de l'agglomération de Stockholm. Le réseau de froid dessert 600 clients et parcourt 206 km.

Au début des années 80, face à la montée des prix des énergies fossiles et suite à la mise en service du parc électronucléaire Suédois, dans le cadre d'un programme de développement national, 600 MW de pompes à chaleur ont été installées dans la région de Stockholm, valorisant des sources variées comme l'eau de mer ou les eaux usées. Elles permettent de bénéficier d'optimisations tarifaires et sont utilisées en partie l'été pour charger les stockages de production d'ECS lorsque les prix d'électricité sont très bas.

La centrale de Vartan regroupe une partie des installations avec 6 PAC de 30 MW. Dans les années 2000, le développement du réseau de froid a été favorisé par la mise en place du fonctionnement en hiver en free chilling. Il profite du passage à proximité de la centrale d'un courant froid pour capter l'eau descendant d'un fjord à 3°C pour fournir au réseau de distribution de froid une énergie peu chère et à très faible contenu carboné. Des pompes à chaleur peuvent produire du chaud à 87°C en utilisant comme source de chaleur, le retour du réseau de froid, ou l'alimentation eau de mer. Le courant à basse température n'est pas présent en été et demi saison et 54 MW de machine ont été rajoutés. Ce sont des pompes à chaleur réversibles qui peuvent être utilisées soit en production simultanée chaleur et froid soit en froid seul.

- **Réseau de chaleur et de froid de Stockholm, centrale Vartan ROPSTEN**

Service : chauffage (hiver et mi- saison). Les sous stations du réseau de chaleur produisent du chauffage saisonnier et de l'ECS (toute l'année)

Froid : toute l'année avec free chilling en hiver.

Machines installées :

6*30 MW PAC Friotherm Unitop® 50FY en exploitation depuis 1984 et 1986.

Puissance thermique 30MW, Puissance électrique 8 MW

Température de production froid. in/out : +2.5 °C/+0.5 °C

Température de production chaud in/out : +57 °C/ +80 °C

Evaporateur Titane

4*12 MW PAC réversibles doubles compresseurs Unitop28Cx et 33CX Friotherm avec modification des circuits suivant les usages, froid seul ou chaud - froid combiné

Puissance cumulée froid 48 MW à 5°C condensation avec une eau de mer à 22°C, condenseurs en titane.

Compresseurs fonctionnant en parallèle

Puissance cumulée en Chaud (Fonctionnement hiver) 35,6MW à 78°C, (production simultanée de froid à 5°C 24MW) sur boucle eau douce avec échangeur eau douce/eau de mer en titane, compresseurs fonctionnant en série, l'eau du réseau de chaleur passe dans le condenseur titane après un rinçage du circuit en eau douce.

Des chaudières électriques de 230 MW, chaudières de cogénération biofuel de 145 MW el / 310 MWth, et des turbines à gaz 3*54 MWel et chaudières de pointes 620 MWth et un stockage de 40 000 m3 viennent compléter le système.

Total des énergies produites en 2009 :

- Chaud 3 287 GWh
- Electricité 930 GWh
- froid 313 GWh

COP Froid annuel : 6,9 comprenant 57% provenant du froid récupéré des PAC et de l'eau de mer (caractérisé comme EnR&R).

COP Chaud : 2,7 centrale Vartan

COP cumulé chaud + froid : 5.

- **Caractéristiques du système eau de mer**



Figure 21 Centrale Varta (Friotherm AG)



Figure 22 PAC UNITOP 50FY Source (Friotherm AG)

Température de captage variable suivant la saison : 3°C en hiver, 22°C en été. Bascule brutale de température entre les deux régimes due à la déviation du courant froid.

Débit Pompage : 10 800 m³/h par machine. Chaque machine a une pompe à vitesse variable en surface
Diamètre / Longueur Conduite : Le canal d'amenée d'eau préexistait. C'est un ouvrage en bois d'un diamètre de 3 m et long de 170 m.
Profondeur du Captage : 15 m
Filtration : Filtre à barreaudage et nettoyage automatique à 800 microns

- **Taux de couverture PAC environ 39% dont 26% eaux usées et eau de mer et 13% électricité**
- 35% Gaz
- 26% Bio fuels
- 26% Eau usée et eau de mer
- 13% Electricité pour les PAC

Types d'émetteurs : Réseau Urbain avec sous stations alimentant une grande variété de bâtiments 6000 clients directs et réseaux secondaires.

6.2.2 Investissement

NC

6.2.3 Maintenance

La maintenance des installations est réalisée par les équipes internes de la société Fortum qui exploite cette installation. Les machines font l'objet d'un contrat avec le constructeur.

6.3 Retour d'expérience : Forum Grimaldi Monte Carlo - Monaco

6.3.1 Description succincte

Le Forum Grimaldi est un bâtiment public de 77 000m² construit en 2000 géré par une société anonyme Monégasque appartenant majoritairement à la Principauté.

D'une puissance thermo frigorifique de 5 500 kW froid et 6 500 kW chaud (4 groupes à vis + 1 groupe à pistons), cette installation assure tout au long de l'année les besoins de chauffage, rafraîchissement et eau chaude sanitaire des 70 000 m² (sur 11 étages) de ce bâtiment à caractère évènementiel (concerts, conférences, expositions).



Figure 23 Forum Grimaldi (Source Forum Grimaldi)

6.3.1 Détails

Caractéristiques du système eau de mer

T° Captage de 13°C (hiver) et jusqu'à 25°C (été). Delta T de 5°C

Profondeur Captage : 10 m

Diamètre Conduite : 1 000 mm

Longueur : 100 m

Distance entre Captage et Rejet : 50 m

Type prise eau de mer : Grille horizontale maille de 8 mm sur une niche béton

Filtration : Bac de décantation, Filtres à tamis en inox précédant chaque pompe (mailles de 400 microns)

Statut du projet : en exploitation

Type de procédé

Production de chaud froid et ECS.

- **Demande Thermique**

Chauffage 1 900 MWh

Froid 6 200 MWh

- 4 machines à vis Trane RTHC D3 de 1,2 MW unitaire soit 4,80 MW Chaud (R134A)
- 1 machine à piston Trane CGWF 430 pour l'ECS soit 430kW chaud (R134A)

Age des machines : 14 ans des équipements Fuels peuvent être mobilisés en secours

Les 4 groupes à vis produisent essentiellement du froid, leur chaleur évacuée sert au préchauffage de l'eau chaude sanitaire ainsi qu'au chauffage des salles.

Le groupe à pistons produit de l'eau chaude sanitaire (65°C) et alimente des ballons d'ECS.

COP annuel 2.75

4 pompes eau de mer en vitesse fixe, débit de 430 à 1 300 m³/h

- **Taux de couverture des installations 98%**
- **Gain environnemental**

Les émissions de CO₂ associées à cette installation sont évaluées à 24 kg eq CO₂/MWh soit 62% par rapport à une solution gaz de référence. Le gain en émission de CO₂, en considérant une production de froid de référence en roof top est de 300 t/an

- **Remarques**

Cette installation ancienne fait l'objet d'un projet de rénovation lourde avec remplacement des groupes froid ainsi qu'une réorganisation de la production et des échangeurs.

Acteurs du projet

SAM forum Grimaldi, Crystal & Dalkia

6.3.2 Investissement

Boucle eau de mer et intermédiaire (coût actualisé) : 1 600 k€ (coût pondéré 295 €/kW)

Locaux et production frigorifiques : 2 700 k€ (coût pondéré 500 €/k)

Coût pondéré : 795 €/kW

6.3.3 Maintenance

Contrat pour plongées d'inspection, Nettoyage des échangeurs deux fois par an, conduite et entretien courant des installations de production et distribution

Budget pondéré P2 et P3 : 10€/MWh

6.3.4 Coût global

Coût pondéré P1, P2 et P3 : 42€/MWh

Le surcoût d'investissement de la solution PAC eau de mer par rapport à la solution de référence est d'environ 45%. Il est compensé par une économie de coût énergétique. Les coûts d'exploitation P2 P3 sont proches entre une situation chaudière gaz et roof top et l'installation du Forum Grimaldi.

6.4 Retour d'expérience : La Divette à Cherbourg

6.4.1 Description succincte

Rénovation de la production d'un réseau de chaleur existant alimentant une résidence de 1 300 logements de Presqu'île Habitat, Office Public de l'Habitat de la Communauté Urbaine de Cherbourg et d'autres propriétaires de bâtiments. Le réseau est alimenté par une production centralisée constituée par des pompes à chaleur et des chaudières gaz. Les pompes à chaleur puisent l'énergie d'une boucle intermédiaire glycolée réchauffée à travers deux échangeurs en titane par de l'eau de mer. Cette nouvelle centrale se substitue à une cogénération moteur gaz.

Statut du projet : en exploitation



Figure 24: Ville de Cherbourg (Source CUC)

6.4.2 Détails

- **Bâtiments m²** :

Service : chauffage (hiver et mi- saison) et ECS (toute l'année)

Besoins Thermiques : Chaud 9000 MWh annuels

- **Caractéristiques du système eau de mer**

Température du captage variable suivant la saison : 7 °C en hiver, 20 °C en été.

Profondeur Captage variable : marnage dans bassin avec écluse > 3.5 m

Rejet proche surface

Distance entre Captage et Rejet > 40 m

Débit Pompage 400 m³/h avec 3 pompes à vitesse variable en surface

Diamètre / Longueur Conduite DN 300 PEHD 40m

Réseau intermédiaire en PEHD DN250 - 300m

Type prise eau de mer : Tube vertical avec crépine autonettoyante par buse de rétro lavage qui fait tourner le panier de crépine, clapet de non-retour au-dessus de la crépine (conception BE Archimède)

Filtration : Filtre à barreaudage et nettoyage automatique à 800 microns

- **Type de procédé**

PAC centralisée sur boucle eau douce et échangeur eau douce/eau de mer en titane.

Modes de production possibles : Chaud

Puissance / Mode

3 Pompes à chaleur YORK doubles compresseurs à vis

- **Taux de couverture > 80%**

Appoint chaudière gaz

Stockage primaire ECS en sous station

COP / EER > 2.5 annuel

Types d'émetteurs / Réseau Emetteurs conventionnels (

Régime T° 63°C – 53°C (chauffage + préchauffage ECS)

- **Gain environnemental**

L'installation permet d'éviter l'émission de l'équivalent de 1.730 tonnes de CO₂ chaque année, soit 62 % de CO₂ qu'une solution gaz.

- **Acteurs du projet**

Association Syndicale de la Divette – Service Public 2000 bureau d'études Archimède Conseil. EDF Optimal Solution & Dalkia

- **Remarques**

Mise au point et gestion ensemble filtration et encrassement délicate.

6.4.3 Investissement

Le projet a nécessité un investissement global d'environ 15 000 K€, le projet a été monté suivant un contrat conception réalisation exploitation.

6.4.4 Maintenance

Les filtres et échangeurs nécessitent des nettoyages réguliers qui s'améliorent avec la fin de la période de mise au point.

6.4.5 Coût global

Le prix de l'énergie vendue par le réseau est de l'ordre de 50€/MWh.

La facture énergétique a été diminuée de 30% pour les habitants du quartier constitué en grande partie de logements sociaux



Figure 25 : Salle Eau De Mer (Source Dalkia)



Figure 26 Salle des machines (Source Dalkia)

6.5.4 Maintenance

Cette installation bénéficie d'un contrat d'entretien full service d'un montant de 1.5 k€ par an.

6.5.5 Gain environnemental

Le bilan environnemental calculé montre une économie de 40 tonnes équivalent CO2

7 SYNOPTIQUE DE REALISATION D'UN PROJET DE PAC SUR EAU DE MER

7.1 Montages juridiques et contractuels

Toutes les solutions sont offertes aux maîtres d'ouvrages pour la réalisation de tels projets, qu'ils soient privés ou publics.

Dans tous les cas, l'installation peut être financée par la maîtrise d'ouvrage et exploitée par elle-même ou confiée à une société spécialisée. Mais les sociétés spécialisées savent aussi proposer une grande diversité de montages, et contrats, plus ou moins engageants sur les performances et pouvant aller jusqu'à la prise du risque de financement.

Pour la maîtrise d'ouvrage publique, un projet PAC-EM peut être monté en CREM, en DSP, concession ou affermage ou encore en PPP.

Les contrats de maintenance simple, de type P2 offrent peu de garantie de performances. A minima les contrats incluant la gestion de l'énergie doivent être privilégiés. Des contrats de performance énergétiques peuvent être facilement mis en place sur ces installations.

Exemple de montage avec production de froid et de chaleur centralisée :

Dans le cas d'une MOA privée disposant d'une PAC-EM produisant directement de l'eau glacée et de l'eau chaude sans boucle de transfert. Un opérateur privé spécialisé a proposé la conception, le financement, la réalisation et l'exploitation de la PAC eau de mer, avec vente de froid et de chaleur à un établissement unique ou à plusieurs clients différents.

Comme la PAC-EM alimente plusieurs clients privés, le projet doit déboucher sur la création d'un réseau de chaleur privé avec un financement partiel par les futurs clients, intéressés par l'économie potentielle sur la durée.

De la même façon que toute autre solution de production thermique centralisée, une PAC-EM peut aussi faire l'objet d'une DSP si le réseau de froid et de chaleur est destiné à alimenter plusieurs sites.

7.2 Financements, aides

7.2.1 Les aides générales mobilisables pour développer la thalasso thermie

Les PAC-EM font partie des équipements performants qui permettent de réduire la production de GES, et peuvent bénéficier à ce titre de plusieurs dispositifs de financement dans le cadre des mesures découlant du Grenelle de l'Environnement :

- Aide au financement des installations par le Fonds Chaleur Renouvelable,
- Aide au financement des réseaux,
- TVA à taux réduite sur le prix de la chaleur.
- Aides FEDER
- Aides locales

7.2.2 Aides du Fonds Chaleur

Engagement majeur du Grenelle Environnement, le Fonds Chaleur a été créé afin de développer la production de chaleur à partir des énergies renouvelables et de récupération (biomasse, géothermie, solaire thermique, biogaz ...). Il est destiné à l'habitat collectif, aux collectivités et à toutes les entreprises (agriculture, industrie, tertiaire). Doté d'un budget de 1,2 milliard d'euros sur sa première période de mise en œuvre (de 2009 à 2013), ce dispositif est géré par l'ADEME.

Les opérations de récupération d'énergie sur eau de mer avec (ou sans) pompe à chaleur sont éligibles aux aides à l'investissement du Fonds Chaleur sous réserve de respecter un certain nombre de paramètres (niveau de production et de puissance, COP machine, ...). Les critères d'éligibilité des projets ainsi que les modalités d'évaluation et d'attribution des aides Fonds Chaleur sont décrites dans la méthode disponible sur le site de l'ADEME :

<http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=25130>

En amont de la réalisation des installations, des aides à la décision peuvent être octroyées lors des phases d'études du projet (subventions pour les études de potentiel thalasso thermique, études de faisabilité, ...).

Les porteurs de projets sont donc invités dès le montage du dossier, à contacter la Direction Régionale de l'ADEME compétente sur le site d'implantation de leur projet (www.ademe.fr, rubrique "l'ADEME en régions")

7.2.3 Eligibilité TVA à taux réduit pour vente de chaleur sur un réseau

Les réseaux de chaleur efficaces peuvent faire bénéficier leurs clients d'une TVA à taux réduit sur la facture énergétique. Un réseau alimenté tout ou partiellement alimenté par une pompe à chaleur peut appliquer cette disposition suivant les conditions suivantes :

- Le réseau de chaleur dessert au moins deux usagers distincts du maître d'ouvrage (deux SIRET),
- La chaleur distribuée sur le réseau est garantie d'origine renouvelable pour sa plus grande partie (minimum 50% en 2014) suivant les critères décrits précédemment.

Les conditions d'application de cette TVA réduite doivent être vérifiées suivant les évolutions réglementaires à la date du projet.

7.2.4 Eligibilité aux CEE

Le dispositif des certificats d'économie d'énergie a été mis en place et couvre des périodes pluriannuelles. Le principe des fiches standards est revu régulièrement en fonction des évolutions techniques, réglementaires et du retour d'expérience. Les fiches standards sont consultables sur le site du ministère :

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Operations-standardisees-.html>

Le dispositif des certificats d'économies d'énergie (CEE) a été créé par les articles 14 à 17 de la loi n° 2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique (loi POPE). Il constitue l'un des instruments phare de la politique de maîtrise de la demande énergétique et met en place un dispositif triennal qui impose une obligation de réalisation d'économies d'énergie.

Ces économies sont établies a priori soit à partir de fiches standardisées où à un système ou une technologie est affecté un potentiel d'économie soit à partir d'opérations spécifiques où pour chaque installation un dossier justifiant des économies potentielles est constitué.

Diverses fiches peuvent être applicables à l'installation PAC-EM, celles-ci sont tenues à jour sur le site du ministère.

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Operations-specifiques-d-economies.html>

7.3 Planning type et étapes clés d'un projet

La durée de réalisation d'un projet d'une puissance de plusieurs MW est la suivante :

- Préfaisabilité : 0.25 à 1.25 mois
- Etude technique de faisabilité : de 6 à 12 mois
- Etudes détaillée de localisation et d'impact et démarches administratives : 15 à 18 mois

Durée totale des premières esquisses jusqu'à la mise en service : 36 à 48 mois

Liste indicative d'installations existantes

France

Dunkerque (Projet en installation en 2014) Complexe tertiaire de La Halle au sucre. Deux PAC-EM doivent assurer la totalité du rafraîchissement et du chauffage

Dieppe : Centre d'Affaires de la Gare Transmanche — France (production de chaleur) *10 kW de puissance chauffage permettent de chauffer environ 250 à 350 m² de bâtiment BBC*

Leucate : (Système en exploitation) Écloserie de naissains d'huîtres – (production de froid et de chaleur)

Ajaccio : Musée Fesch

Marseille : Euromed – Musées du MuCem et CEREM

Lorient : (Système en exploitation) Cité de la Voile Tabarly Reconversion base sous-marine afin de produire de l'énergie thermique et frigorifique avec un rendement élevé (pompage de l'eau de mer, avec des pompes à variation de vitesse ajustée à la demande pour réduire les consommations énergétiques lors des faibles demandes) ; rafraîchissement en été du rez-de-chaussée par circulation d'eau de mer dans le plancher réversible chauffant / rafraîchissant

La Rochelle : (Système en exploitation) Aquarium

Cannes : (Système en exploitation) Palais des festivals

La Seyne-sur-mer : (Système en exploitation et développement depuis 2009) Boucle tempérée, production décentralisée. 14 000 m² de tertiaire et 30 000 m² de logements. Climatisation et chauffage. 4 800 kW (capacité d'échange) multi machines distribuées Scroll. 3 pompes eau de mer de 160 m³/h avec variateurs de débit.- 3 pompes eau réfrigérée de 160 m³/h.- 3 préfiltres en amont des pompes eau de mer.- 3 filtres à sable automatiques en amont des échangeurs eau de mer.- 3 échangeurs à plaques d'une capacité d'échange de 1 600 kW soit 4 800 kW.- Rejet eau de mer en tube PVC et PEHD \varnothing 315 mm.- Boucle "eau réfrigérée" après échange eau de mer en PEHD DN 300 mm.

Biarritz : (Système en exploitation) Casino

Projet de SWAC : Sea Water Air Conditioning (pas de pompe à chaleur):

Basse terre en Guadeloupe

Hôpital de St Pierre à La Réunion

Réseau de Froid de St Denis à La Réunion

Monaco

Forum Grimaldi (Système en exploitation) (voir fiche REX)

Quai Antoine premier (Système en exploitation)

Plus de 50 systèmes en opération

International

États-Unis

Alaska - (Système en exploitation) SeaLife Center – Seward – (production de chaleur)

Norvège

Bodø – (Système en exploitation) ancienne Base militaire de l'OTAN – (production de chaleur)

Fornebu – North plant : Système en exploitation depuis 2001 - production de chaleur et froid (15 000 kWf -13 600 kWc)

Fornebu Rolfsbukta Système en exploitation depuis 2013 - production de chaleur et de froid

Suède

Stockholm (Système en exploitation) Vartan Ropsten : Réseau de chaleur et de froid avec production centralisée, free chilling en hiver – 180 MW (6x30 MW) PAC centrifuge à 87°C, COP de 2.7 http://www.friotherm.com/webautor-data/41/vaertan_e008_uk.pdf

Pays bas

Scheveningen (La Haye) –(Système en exploitation) réseau de chaleur pour 789 nouveaux logements du quartier Duindorp <http://www.enerzine.com/7/4869+de-la-chaleur-issu-de-l-eau-de-mer+.html>

Liste indicative des fournisseurs de pompe à chaleur

Machines industrielles

CIAT : http://www.ciat.fr/rubrique/index/fra-nos-produits-catalogue/33/prod_cat-Pompes-a-chaleur/13

Carrier : http://www.carrier.fr/Documents/Produits/CARRIER_PLQ_61WG_FR.pdf

Daikin : <http://www.daikin.fr/industrie/applications/centrales-de-refroidissement/>

Johnson Control York

<http://www.johnsoncontrols.fr/content/fr/fr/search.html?q=pac&cx=006832237039281887201%3Ayknjkknwgha&cof=FORID%3A11%3BBNB%3A1&filter=0&qstart=&qfilter=&qdatefilter=&encoded=112%2197%2199%21>

Friotherm : <http://www.friotherm.fr/fr/chauffage-urbain/>

GEA Matal : http://www.gea-happel.fr/pictures/productdocs/Groupes%20froids/Groupes_froids_gamme_042008.pdf

Mitsubishi Heavy Industry http://www.mhi-global.com/discover/earth/technology/heat_pump.html

Star : <http://www.star-ref.co.uk/star/industrial-heating.html>

Trane : http://www.trane.com/commercial/Uploads/Pdf/cso/384/PROD-PRC014-FR_0406.pdf

Autres machines

Association Française des Pompes à Chaleur- AFPAC : <http://afpac.org/lafpac/nos-membres>

Liste indicative de bureau d'études spécialisés

CREOCEAN Zone TECHNOCEAN - Rue Charles Tellier - 17000 La Rochelle - FRANCE
Tél. 05 46 41 13 13

EGIS Eau 15 avenue du Centre 78286 Saint-Quentin-en-Yvelines
Tél. : +33 (0)1 39 41 40 00

SOGREAH (Grenoble), 3500 route de Revel 38870 St Pierre de Bressieux
Tél. +33 (0)4 74 20 02 40

SCS-Ingénierie 34, Chemin du Moulin 06650 OPIO
Tél. : +33.(0).4.93.77.74.22

EJN NEGRI Z.I. Le Tonkin Secteur des Bétonniers 13270 FOS sur MER
Tél. +33 (0)4 42 48 39 70

ACRI IN : 260 Route du Pin Montard -06904 Sophia-Antipolis Cedex
Tél. : +33 4 92 96 29 00

SUD EXE Bureau d'études 987 avenue de Provence - 06140 Vence
Tel: 04.93.58.33.20

ETPO 3 place du sanitat - 44 100 Nantes
Tél. 02 40 44 27 00

Sinay 117, Cours Caffarelli. 14000 CAEN .
Tél. : +33 (0)2 50 01 15 5

IN VIVO Environnement - ZA La Grande Halte - 29940 La Forêt-Fouesnant –
Tél. : +33 (0)2 98 51 41 75 - Fax. : +33 (0)2 98 51 41 55

ANDROMEDE OCEANOLOGIE 7, place Cassan 34280 Carnon
Tel : 04 67 66 32 48

Liens internet utiles

Site ADEME : <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=13089>

Glossaire ADEME : <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=12843&p1=20>

Gestion Fonds Chaleur ADEME : <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=23403>

Circulaire exploitation eau chaude sanitaire (ECS): http://www.sante.gouv.fr/fichiers/bo/2011/11-01/ste_20110001_0100_0130.pdf

Opérations standardisées CEE : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Operations-standardisees-.html>

AFPAC : <http://afpac.org/lafpac/nos-membres>

Optimapac - programme de recherche : <http://www.polemermediterranee.com/Environnement-et-amenagement-du-littoral/Amenagement-cotiers-durables-et-genie-ecologique/OPTIMA-PAC>

Eurovent ESEER : [*\(LCP\), programme certification \(LCP\) - Eurovent Certification*](#)

Ecolabel Pompe à chaleur : <http://www.ecolabels.fr/fr/recherche-avancee/categories-de-produits-ou-services-certifies/appareils-electriques/pompes-a-chaleur-electrique-a-gaz-ou-a-absorption-a-gaz>

Bref refroidissement, Meilleurs techniques disponibles : http://www.ineris.fr/ippc/sites/default/files/files/cvs_bref_1201_VF_1.pdf

Rhône Alpes Energie efficacité des pompes à chaleur : http://www.raee.org/administration/publis/upload_doc/20111221014127.pdf

Glossaire

Affouillement : Action de creusement due aux remous et aux tourbillons engendrés dans un courant fluvial ou marin butant sur un obstacle naturel ou artificiel

Bathymétrie : Mesures de la profondeur de l'océan pour en déterminer la topographie du fond.

Biocénoses : un groupement d'êtres vivants dont la composition, le nombre des espèces et celui des individus reflète certaines conditions moyennes du milieu ; ces êtres sont liés par une dépendance réciproque. Les biocénoses sont souvent dissociées en phytocénoses (communautés végétales) et zoocénoses (communautés animales)

Contrat PPP : partenariat public privé : Contrat administratif par lequel l'Etat ou un établissement public de l'Etat confie à un tiers, pour une période déterminée en fonction de la durée d'amortissement des investissements ou des modalités de financement retenues, une mission globale ayant pour objet la construction ou la transformation, l'entretien, la maintenance, l'exploitation ou la gestion d'ouvrages, d'équipements ou de biens immatériels nécessaires au service public, ainsi que tout ou partie de leur financement à l'exception de toute participation au capital. **Ordonnance n° 2004-559** du 17 juin 2004 (modifiée par la loi n°2008-735 du 28 juillet 2008 relative aux contrats de partenariat et par l'art. 14 de la LAPCIPP)

Contrat DSP : contrat par lequel une personne morale de droit public confie la gestion d'un service public dont elle a la responsabilité à un délégataire public ou privé, dont la rémunération est substantiellement liée au résultat de l'exploitation du service. Le délégataire peut être chargé de construire des ouvrages ou d'acquérir des biens nécessaires au service.

Contrat CREM : Contrat réalisation exploitation maintenance, nouvelle famille de marchés publics globaux, associant soit des prestations de réalisation et d'exploitation ou de maintenance (marchés dits « REM »), soit des prestations de conception, de réalisation et d'exploitation ou de maintenance (marchés dits « CREM »). Ils sont encadrés par l'article 73 du code des marchés qui ne peuvent être conclus que sur la base d'« objectifs chiffrés de performance ».

COP : Coefficient de performance. Valeur descriptive de la performance d'une machine ou d'une installation. Voir 2.4.4 ci-dessus

Chiller ou *Groupe de production d'eau glacée* : groupe froid servant à produire de l'eau glacée. *La quantité de chaleur produite au condenseur n'est pas valorisée.*

Climatisation : procédé qui consiste à contrôler et réguler de façon dynamique contrôler et réguler les conditions climatiques d'un local fermé sur les valeurs de température et d'humidité.

ECS : Eau Chaude sanitaire. Cette notion est encadrée en France par plusieurs textes réglementaires, voir 4.2.2 ci-dessus

Eau glacée : eau refroidie à une température inférieure à la température du point de rosée et qui permettra de mettre en œuvre une climatisation. Généralement, on considère de l'eau inférieure à 10°C comme étant de l'eau glacée.
ENR&R : Energie Renouvelable ou de Récupération

Eutrophisation : Enrichissement naturel ou artificiel d'une eau en matières nutritives

Free Chilling : utilisation d'une source froide existante d'origine renouvelable ou fatale pour refroidir une boucle d'eau glacée.

Loi d'eau : la loi d'eau est une loi de régulation qui ajuste la température de production d'eau de chauffage en fonction de critères déterminés, en général la température extérieure souvent compensée en fonction de la température intérieure. La loi d'eau permet d'adapter l'énergie véhiculée au strict nécessaire et donc d'améliorer les performances des installations.

MISE : Mission inter-services de l'eau Structure préfectorale qui rassemble différents services (DDAF, DDASS, la DDE, agences de l'eau, DREAL, etc). pour assurer la politique de l'eau. Sa mission est de faciliter la coordination et la cohérence des actions ayant un impact sur l'eau et les milieux aquatiques.

Pompe à chaleur : système de production de froid à compression utilisé pour valoriser la chaleur dégagée au condenseur. La production de chaleur est pilotée, il est possible de valoriser la quantité de froid produite.

Rafraîchissement : procédé qui consiste à rafraîchir la température d'un local fermé sans en contrôler l'humidité. Le confort d'une ambiance rafraîchit peut être très inférieur à celle d'une ambiance climatisé.

Taux de couverture : il se définit donc comme la part des besoins annuels en énergie couverts par l'énergie provenant de l'installation considérée divisée par l'ensemble des besoins thermiques du système. Formule de calcul: Taux de couverture PAC = Production utile sortie PAC / Besoins thermiques totaux.

TEWI : Total equivalent warming impact quantification de l'impact de réchauffement climatique global d'une installation en prenant en compte

l'impact direct lié aux éventuelles fuites de fluide frigorigène et l'impact indirect lié au contenu carbone de l'énergie électrique consommée.

Thermo-frigo-pompe : Système de production de froid à compression dont la chaleur dégagée au condenseur est également valorisée. La production de froid est pilotée et conditionne la quantité de chaleur produite.

Bibliographie

- Etude du potentiel thalasso thermique de la Région PACA -Rapport final - Région Provence-Alpes-Côte d'azur - Direction de l'Environnement, du Développement Durable et de l'Agriculture Service Energie, Déchets, Air et Technologies de l'Environnement
- P. BAILER, U. Petruchia September 2006 : District heating and cooling with large centrifugal heat pumps - 10th symposium for district heating and cooling September 2006
- SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE « ETAT DES LIEUX ET PERSPECTIVES DE DEVELOPPEMENT DE LA FILIERE GEOTHERMIE TRES BASSE ENERGIE EN HAUTE-NORMANDIE » ADEME haute Normandie
- Commune de la Seyne-sur-Mer, 2005 – Dossier de déclaration d'ouvrage public réalisé en contact avec le milieu aquatique.
- DICKSON D., 1976 – Pollution thermique de l'environnement aquatique.
- GALATEA., 2008 – Identification de l'impact du rejet d'une pompe à chaleur sur le milieu marin – Fairmont Hôtel. Rapport R090801.
- KHALANSKI M., 1988.- Rejets thermiques dans le milieu marin côtier : Aperçu de l'expérience acquise sur le site des Gravelines., EDF.
- KERAMBRUN P., 1983 - Conséquences de la pollution thermique sur les organismes marins.
- PARACHE A., 1988 – Influence du réchauffement lié au fonctionnement d'une centrale électrique sur le cycle de reproduction de *Mytilus galloprovincialis* (Martigues-Ponteau).
- VERLAQUE M., GIRAUD G., BOUDOURESQUE C.F., Le peuplement algal au voisinage de la centrale de Martigues-Ponteau (Golfe de Fos France) : étude de la zone de décollement de la tâche thermique.
- VICENTE N., 1985 – Effets des rejets thermiques en zone littorale. Colloque Franco-japonais d'océanographie.
- CYCLES DE REPRODUCTION NATURELLE DES MOULES DARDIGNAC MJ , IFREMER, Place du Séminaire, 17137L'Houmeau
- Bref refroidissement : http://www.ineris.fr/ippc/sites/default/files/files/cvs_bref_1201_VF_1.pdf

Synthèse

Ce document s'adresse, aux bureaux d'études thermiques, il a pour ambition de présenter l'ensemble des éléments à connaître avant d'initier une démarche visant à développer ou réaliser une opération mettant en œuvre des pompes à chaleur sur eau de mer.

Les pompes à chaleur sur eau de mer associent deux secteurs d'activité très éloignés l'un de l'autre d'une part la ressource maritime est sa biodiversité, avec une température subie, plus ou moins variable, et d'autre part des bâtiments dont les besoins énergétiques sont très variables et peu adaptables.

L'objectif de ce guide est de fournir aux maîtres d'ouvrage publics ou privés et à leurs conseils, bureaux d'études, exploitants d'installations et en général à tous les acteurs pouvant être impliqués dans d'un projet de type pompe à chaleur sur eau de mer (PAC-EM) les éléments fondamentaux pour des réalisations performantes techniquement et économiquement.

Il vise à présenter diverses solutions, en comparer les avantages et inconvénients, présenter les points de vigilance, les différents aléas et risques associées à ce type de projet et mettre en avant les solutions éprouvées ou d'avenir :

- Principe des PAC-EM et domaines d'application,
- Descriptif des diverses solutions propositions de clés de budgétaires d'investissement et d'opération,
- Impacts des PAC-EM et démarches administratives,
- Déroulement d'un projet,

Les avantages environnementaux des PAC-EM sont les suivants :

- Utilisation d'une ressource renouvelable,
- Efficacité énergétique élevée,
- Economie de coût énergétique,
- Réduction des nuisances sonores et sanitaires : aucun équipement en toiture,
- Réduction des émissions de CO₂ de l'ordre de 60 à 70%,
- Pas d'effet négatif sur le milieu marin dans des conditions de réalisation et d'exploitation à respecter.

Cependant, ces atouts doivent être mis en perspectives avec les contraintes et particularités des diverses solutions afin de garantir le succès des opérations, tant sur le plan technico-économique qu'environnemental..

Remerciements

Ce guide a été réalisé à partir des documents rédigés par différents groupes de travail et de relecture composés de David Canal et Marie Astrid Cardona-Maestro pour l'ADEME, Michel Colinet pour Créocéan, Jean Paul GIRARD et Bertrand Guillemot pour Dalkia, de Marie Christine HUAU, Philippe Maillard et Marc Perraudeau de Veolia. Nous les remercions chaleureusement pour le temps consacré à ces travaux.