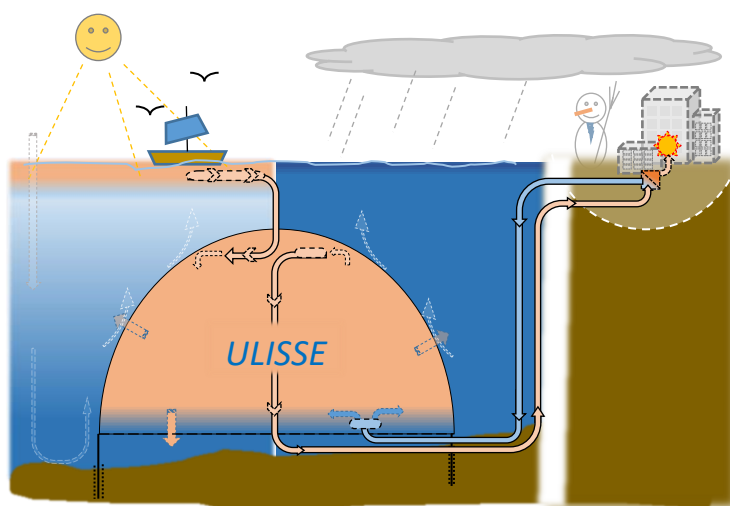

Under Lake Infrastructure for thermal capture and Storage of Solar Energy (ULISSE)

(Infrastructure sous-lacustre de capture
et de stockage d'énergie solaire thermique)

Étude exploratoire du Projet ULISSE (SOUR Call 1-2021)

Appendix du Rapport Final (version intégrale et originale française)



 *Under Lake Infrastructure for thermal capture and Storage of Solar Energy*

Source: © CvS énergies sàrl

William van Sprolant, CvS énergies sàrl
Boulevard Helvétique 36, 1207 Genève, Suisse

Institut hôte

h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

Hes•SO GENÈVE
Haute Ecole Spécialisée
de Suisse occidentale

Date : 25.01.2024

Lieu : Bern

Projet début – fin : 01.09.2021 – 31.05.2023

Bénéficiaire de la subvention :

Institut hôte HEPIA

Rue de la Prairie 4, CH-1202 Genève

www.hesge.ch/hepia

Auteur :

William van Sprolant, CvS Énergies sàrl, cvs-energies@mecacerf.ch

Seul l’auteur est responsable du contenu et des conclusions de ce rapport.

Collaborations / Contributions : HEPIA (par ordre alphabétique):

Alain Dubois, Reto Camponovo, Daniel Bello Mendes, Jean-François Rubin, Peter Gallinelli, Jeremy Olivier, Roland Rozsnyo Gilles Trisconne, Zsolt Vecsernyes <https://www.hesge.ch/hepia/annuaire>

L’institut hôte HEPIA a également fourni un co-financement au projet ULISSE.

Objet

Le présent rapport porte sur l’étude exploratoire du système/projet ULISSE (*Under Lake Infrastructure for capture and Storage of Solar Energy*). L’étude a été subventionnée par l’Office fédéral de l’énergie (OFEN) suite à l’appel à projet « SOUR Call 1-2021 » (*SWEET Out the box Rethinking*) dans le cadre de la Transition énergétique 2050 de la Suisse.

En tant que projet innovant et non conventionnel (*Outside-the-box*), l’étude explore plusieurs concepts complémentaires et inédits dans leurs réalisations, ce qui nécessite des explications substantielles et le développement conséquent du bien-fondé du projet, pour autant « *sans épuiser le sujet* ».

En tant que *Appendix* du Rapport Final, la présente version originale étendue et écrite en français, explique le langage correspondant de certaines figures, abréviations et symboles de la version étendue anglaise et traduite par DeepL. Le Rapport Final et ces *Appendix* sont publiés sur la base de données ARAMIS des projets de recherche, d’innovation et d’évaluation financés ou exécutés par la Confédération (<https://www.aramis.admin.ch/>).

Résumé

Face aux changements climatiques la Stratégie Énergétique Suisse 2050 (SES-2050) vise la « double neutralité » nucléaire & carbone (2035-2050) et prévoit un déficit structurel en semestre hiver de 9 TWh d'électricité (équivalent à la capacité nationale d'accumulation hydroélectrique). Il résulte du retrait planifié de l'électricité nucléaire en 2035 et de l'augmentation de la demande d'électricité, pour la mobilité électrique, les pompes à chaleur (HP) pour la climatisation, le chauffage du bâti et l'eau chaude sanitaire, ainsi que pour la décarbonation de l'industrie. L'enjeu majeur de la SES-2050 est donc de disposer de suffisamment d'électricité « doublement neutre » en hiver.

La présente étude explore le potentiel du système inédit ULISSE (Under Lake Infrastructure for capture and Storage of Solar Energy) associé à la possibilité de combiner le procédé CORSAIRE « free heating » (sans HP). ULISSE vise à améliorer l'efficacité des Réseaux Thermo Lacustres (RTLs), potentiellement implantés dans les 15 grands lacs suisses, tout en induisant avantageusement l'oxygénation profonde desdits lacs par la convection thermique externe des réservoirs ULISSE. Le CORSAIRE free heating quant à lui vise à réduire l'impact énergétique négatif sur le parc immobilier induit par la chute hivernale de la température du Réseau public d'Eau Potable (REP).

Le système ULISSE est constitué de grands réservoirs de stockage saisonnier de chaleur ancrés sur les fonds lacustres (capacité unitaire : 2 millions m³ & 125 TJ). Ils sont chargés en été d'eau tempérée, soit issue de la couche supérieure du lac chauffée par le soleil, soit par des rejets de chaleur industrielle et de climatisation. Les réservoirs ULISSE sont une source lacustre de chaleur hivernale d'eau à environ 20°C, au lieu d'ordinaire à 5-6°C. Ceci peut doubler l'efficacité des HP et diminuer de moitié leur consommation électrique, réduire d'un facteur 5 le volume d'eau et de 95 % l'énergie électrique de pompage et de circulation de l'eau dans le RTL.

L'étude réalise une première analyse du potentiel énergétique et d'une possible structure (enveloppe, ancrage) du réservoir ULISSE, l'esquisse de son système de chargement/déchargement thermique ainsi que ses potentielles interactions lacustres (thermiques, hydrodynamiques, environnementaux). Plus spécifiquement est aussi réalisé une étude croisée (aux résultats convergents) de l'efficacité du stockage thermique saisonnier du réservoir ULISSE, ceci par trois approches complémentaires : l'élaboration d'un modèle théorique, une maquette avec analyse fondamentale du facteur d'échelle temporelle ainsi qu'une simulation numérique (COMSOL).

À titre d'exemple majeur, l'étude analyse les performances énergétiques globales du système ULISSE - CORSAIRE appliqué au RTL GeniLac et au REP à Genève, les comparent au système de capture et de stockage saisonnier de chaleur solaire « terrestre » (champ de capteurs + bassin couvert), puis l'extrapole à l'échelle nationale.

En résultat et conclusion du projet, environ 300 Réservoirs ULISSE répartis de façon invisible dans les 15 grands lacs suisses et en association avec le free heating CORSAIRE (y compris hors des régions lacustres) pourraient potentiellement fournir près de 60 PJ soit 30 % des 200 PJ des besoins nationaux d'énergie-chaleur pour le chauffage ambiant et l'eau chaude sanitaire. Pour un investissement global estimé à environ 3 à 4 milliards de CHF (réservoirs ULISSE, échangeurs de chaleur CORSAIRE, conduites), ceci permettrait d'économiser 3 TWh d'électricité brut en semestre d'hiver 2050 soit le 1/3 des 9 TWh de déficit hivernal d'électricité et équivalent au double de la production hivernale du plus grand complexe hydroélectrique suisse de la Grande Dixence (2 x 1,5 TWh).

Finalement, l'étude propose la réalisation d'un Réservoir ULISSE pilote. Celui-ci serait relié aux RTLs des campus EPFL-UNIL, avec observations par le laboratoire flottant LÉXPLORE ainsi qu'un pilote CORSAIRE sur la Cité du Lignon (6'500 habitants et commerces) et alimentée avec les rejets thermiques de la Station d'épuration des eaux usées d'Aire à Genève.

Mots-clefs : réseau thermo lacustre, free cooling, free heating, stockage saisonnier de chaleur sous-lacustre, déglacage hivernal, correction température du réseau d'eau potable, pompe à chaleur, GeniLac, Genève.

Abstract

Faced with climate change, the *Swiss Energy Strategy 2050* (SES-2050) is aiming for "double neutrality" nuclear & carbon (2035-2050) and forecasts a structural deficit in the winter semester of 9 TWh of electric energy (equivalent to the national hydroelectric storage capacity). This is the result of the planned withdrawal of nuclear power in 2035 and the increase in demand for electricity, for electric mobility, heat pumps for air conditioning, room heating and domestic hot water, as well as for the decarbonisation of industry. The major challenge for the SES-2050 is therefore to have enough "doubly neutral" electricity available in winter.

This study explores the potential of the novel ULISSE system (*Under Lake Infrastructure for capture and Storage of Solar Energy*), as well as the possibility to be combined with the CORSAIRE "free heating" process (without heat pumps). ULISSE aims to improve the efficiency of the Thermal Lacustrine Networks (TLNs), to be potentially installed in the 15 major Swiss lakes, while providing advantageously deep oxygenation of said lakes, induced by external thermal convection of the ULISSE reservoirs. CORSAIRE free heating aims to reduce the negative energy impact on buildings caused by the winter drop in temperature of the public Drinking Water Network (DWN).

The ULISSE system concept consists of large seasonal heat storage reservoirs anchored to the lake bed (typical unit capacity: 2 million m³ & 125 TJ). In summer, they are filled with temperate water, either from the upper layer of the lake heated by the sun, or from industrial and air-conditioning waste heat. The ULISSE reservoirs would constitute a source of winter heat from the lake water at around 20°C, instead of the usual 5-6°C. This can double the efficiency of the heat pumps and halves their electricity consumption, reducing the volume of water by a factor of 5 and the electrical energy required to pump and circulate the water in the TLNs by 95%.

The study provides an initial energetic potential and feasibility analysis of a possible structure (envelope, anchoring) for the ULISSE reservoir, a sketch of its thermal loading/discharging system and some hints regarding its potential interactions with the lake ambient (thermal, hydrodynamic, environmental). More specifically, a cross-study (with converging results) of the efficiency of the seasonal thermal storage of the ULISSE reservoir was also carried out, using three complementary approaches: the construction of a theoretical model, a mock-up with a fundamental analysis of the Temporal Scaling Factor, and a numerical simulation (COMSOL).

As a major example, the study analyses the overall energy performance of the ULISSE - CORSAIRE system applied to the GeniLac TLN and the DWN in Geneva, and compares it with the system for capturing and storing seasonal "terrestrial" solar heat (collector field + covered basin), then extrapolates it to the national scale.

As a result, and conclusion from the project, around 300 ULISSE reservoirs spread invisibly across the 15 major Swiss lakes and combined with CORSAIRE *free heating* (including outside the lake regions) could have the potential to supply almost 60 PJ or 30% of the 200 PJ of national energy-heat requirements for ambient heating and domestic hot water. For an overall investment estimated to around CHF 3 to 4 billion (ULISSE reservoirs, CORSAIRE heat exchangers, pipelines), this would save 3 TWh of gross electricity in the winter semester 2050, i.e., 1/3 of the 9 TWh winter electricity deficit and equivalent to twice the winter production of Switzerland's largest hydroelectric complex, Grande Dixence (2 x 1.5 TWh).

Finally, the study proposes a pilot ULISSE Reservoir, connected to the TLNs on the EPFL-UNIL campuses, with observations by the LÉXPLORE floating laboratory as well as a pilot CORSAIRE in the Cité du Lignon (6,500 inhabitants and shops) and supplied with thermal waste from the Aïre wastewater treatment plant in Geneva.

Keywords: thermal lacustrine network, free cooling, free heating, seasonal sub-lacustrine heat storage, winter de-icing, temperature correction of drinking water network, heat pump, GeniLac, Geneva.

Zusammenfassung

Angesichts des Klimawandels strebt die Schweizer Energie Strategie 2050 (SES-2050) eine "doppelte Neutralität" in Nuklear & Kohlenstoff (2035-2050) an und prognostiziert im Wintersemester ein strukturelles Defizit von 9 TWh Strom (entspricht der nationalen Speicherkapazität von Wasserkraft). Das Defizit resultiert aus dem geplanten Atomausstieg im Jahr 2035 und dem steigenden Strombedarf für Elektromobilität, Wärmepumpen (WP) für Klimatisierung, Gebäudeheizung und Warmwasserbereitung sowie für die Dekarbonisierung der Industrie. Die grosse Herausforderung für die SES-2050 besteht daher darin, im Winter genügend „doppelt neutralen“ Strom zur Verfügung zu haben.

Diese Studie untersucht das Potential des neuartigen ULISSE-Systems (*Under Lake Infrastructure for capture and Storage of Solar Energy*) sowie die Möglichkeit zur Kombination mit dem CORSAIRE "freie Heizung" (Prozess ohne WP). Ziel von ULISSE ist es, die Effizienz der Thermische Seenetze (TSNs) zu verbessern, die möglicherweise in den 15 grossen Schweizer Seen installiert werden sollen, und gleichzeitig eine vorteilhafte Tiefensauerstoffanreicherung dieser Seen zu gewährleisten, die durch externe thermische Konvektion der ULISSE-Reservoirs induziert wird. CORSAIRE freie Heizung zielt darauf ab, die negativen Energieauswirkungen auf den Immobilienbestand zu reduzieren, die durch den winterlichen Temperaturabfall der Trinkwassernetze (TWN) verursacht werden.

Das ULISSE-System besteht aus grossen saisonalen Wärmespeicherreservoirs, die am Seeboden verankert sind (Einheitskapazität: 2 Millionen m³ und 125 TJ). Im Sommer werden sie mit temperiertem Wasser gefüllt, entweder aus der von der Sonne erwärmten oberen Schicht des Sees oder aus Industrie- und Klimaanlagenabwärme. Die ULISSE-Reservoirs würden im Winter eine Wärmequelle aus dem Seewasser mit etwa 20 °C statt der üblichen 5-6 °C darstellen. Dadurch kann die Effizienz der Wärmepumpen verdoppelt und ihr Stromverbrauch halbiert werden, wodurch die Wassermenge um den Faktor 5 und die elektrische Energie, die zum Pumpen und Umwälzen des Wassers in den TSNs erforderlich ist, um 95 % reduziert werden.

Die Studie liefert eine erste energetische Potenzial- und Machbarkeitsanalyse einer möglichen Struktur (Hülle, Verankerung) für das ULISSE-Reservoir, eine Skizze seines thermischen Lade-/Entladesystems und einige Hinweise zu seinen möglichen Wechselwirkungen mit der Seeumgebung (thermisch, hydrodynamisch, umweltbedingt). Genauer gesagt wurde auch eine Kreuzstudie (mit konvergierenden Ergebnissen) der Effizienz der saisonalen Wärmespeicherung des ULISSE-Reservoirs durchgeführt, wobei drei komplementäre Ansätze zum Einsatz kamen: die Konstruktion eines theoretischen Modells, ein Modell mit einer grundlegenden Analyse von der zeitliche Skalierungsfaktor und eine numerische Simulation (COMSOL).

Als Beispiel, die Studie analysiert die Energieleistung des ULISSE-CORSAIRE-Systems, welches auf das TSN GeniLac und das TWN in Genf angewendet wird, und vergleicht sie mit dem saisonalen "terrestrischen" Solarwärmeerfassungs- und -Speicher System (Kollektorfeld + überdachtes Becken). Anschliessend wird es auf die nationale Ebene hochgerechnet.

Als Ergebnis und Fazit des Projekts könnten rund 300 ULISSE-Reservoirs, die unsichtbar über die 15 grossen Schweizer Seen verteilt sind, in Kombination mit der freien Heizung von CORSAIRE (auch ausserhalb der Seeregionen) das Potential haben, fast 60 PJ oder 30 % der 200 PJ des nationalen Energie-Wärme-Bedarfs für Raumheizung und Warmwasser bereitstellen. Bei einer geschätzten Gesamtinvestition von rund 3 bis 4 Milliarden Franken (ULISSE-Speicher, CORSAIRE-Wärmetauscher, Rohrleitung) würde dies im Winterhalbjahr 2050 3 TWh Bruttostrom einsparen, also 1/3 des Winterstromdefizits von 9 TWh. Das entspricht der doppelten Winterproduktion des grössten Wasserkraftwerks der Schweiz, Grande Dixence (2 x 1,5 TWh).

Schliesslich schlägt die Studie die Schaffung eines Pilot-ULISSE-Reservoirs vor, das mit den TSNs auf den EPFL-UNIL-Campussen verbunden ist, mit Beobachtungen durch das schwimmende LÉXPLORE-Labor sowie eines Pilot-CORSAIRE der Cité du Lignon (6.500 Einwohner und Geschäfte), der mit thermischen Abfällen aus der Kläranlage Aire in Genf versorgt.

Schlüsselwörter: Seewärmenetz, freie Kühlung, freie Heizung, saisonale Wärmespeicherung unterhalb des Sees, Winter Temperaturkorrektur des Trinkwassernetzes, Wärmepumpe, GeniLac.

Riassunto

Di fronte ai cambiamenti climatici, la Strategia Energetica Svizzera 2050 (SES-2050) punta alla "doppia neutralità" Nucleare & Carbone" (2035-2050) e prevede un deficit strutturale nel semestre invernale di 9 TWh di elettricità (equivalente di capacità al fabbisogno nazionale accumulo idroelettrico). Deriva dal previsto ritiro dell'energia elettrica dal nucleare nel 2035 e dall'aumento della domanda di energia elettrica per la mobilità elettrica, le Pompe Di Calore (PDC) per la climatizzazione e il riscaldamento degli edifici, nonché per la decarbonizzazione dell'industria. La sfida principale del SES-2050 è quindi quella di avere abbastanza elettricità "doppiamente neutrale" in inverno.

Questo studio esplora il sistema originale ULISSE (*Under Lake Infrastructure for capture and Storage of Solar Energy*) associato al CORSAIRE "free heating" (senza PDC). ULISSE mira a migliorare l'efficienza delle Reti Termo-Lacustri (RTL) potenzialmente impiantato nei 15 grandi laghi svizzeri, e proteggendo al tempo stesso questi laghi dal riscaldamento globale, in particolare attraverso l'ossigenazione profonda (Hypolimnion) indotta dalla convezione esterna dei serbatoi sublacustri dell'ULISSE. Il CORSAIRE *free heating* mira a ridurre l'impatto energetico negativo sul patrimonio immobiliare indotto dal abbassamento invernale della temperatura della Reti pubbliche di Acqua Potabile (RAP).

Il sistema ULISSE è costituito da grandi serbatoi di accumulo termico stagionale, ancorati ai fondali lacustri (capacità unitaria: 2 milioni di m³ e 125 TJ). D'estate si caricano con acqua temperata, o dallo strato superiore del lago (Epilimnion) riscaldata dal sole, o dal calore di scarto industriale e di climatizzazione. I Bacini di ULISSE sono una fonte lacustre di caldo invernale intorno ai 20°C, superiore all'ordinario a 5-6°C. This increases the efficiency of heat pumps and reduces their electricity consumption, cutting water volume by a factor of 5 and reducing electricity consumption for pumping and circulating water in the Reti Thermo Lacustre (RTL) by 95%.

Lo studio prevede un primo sviluppo ed analisi di una possibile struttura (involucro, ancoraggio) del bacino di tipo ULISSE, lo schema del suo sistema di carico/scarico termico nonché le sue potenziali interazioni lacustri (termiche, idrodinamiche, ambientali), senza tuttavia "esaurire i soggetti". Più nel dettaglio, viene effettuato anche uno studio trasversale (con risultati convergenti) dell'efficienza dell'accumulo termico stagionale del giacimento ULISSE, utilizzando 3 approcci complementari: modello teorico, modello con analisi fondamentale del fattore di scala temporale nonché uno studio numerico simulazione (COMSOL).

Lo studio analizza le prestazioni energetiche del sistema ULISSE - CORSAIRE applicato al RTL Genilac e al RAP di Ginevra, confrontarli con il sistema stagionale di cattura e accumulo del calore solare "terrestre" (campo collettori + bacino coperto), poi lo estrapola alla scala nazionale.

Di conseguenza, circa 300 serbatoi ULISSE distribuiti invisibilmente nei 15 grandi laghi svizzeri e in associazione al riscaldamento gratuito CORSAIRE (senza pompa di calore e anche al di fuori delle regioni lacustri), potrebbero fornire quasi 60 PJ ovvero il 30% dei 200 PJ del fabbisogno nazionale di calore energia per il riscaldamento degli ambienti e l'acqua calda sanitaria. For a total investment of around 3-4 billion franchi (ULISSE hot water tanks, CORSAIRE heat recovery systems, piping), this would allow 3 TWh of northern electricity to be recovered in the winter half of 2050, ovvero 1/3 del deficit di elettricità invernale di 9 TWh, pari al doppio della produzione invernale del più grande complesso idroelettrico svizzero di Grande Dixence. (2 x 1.5 TWh).

Infine, lo studio propone di creare un bacino pilota e dimostrativo ULISSE (P+D), collegato agli RTL dei campus EPFL-UNIL, con osservazioni da parte del laboratorio galleggiante LÉXPLORE, e di un CORSAIRE pilota in la Cité du Lignon (6.500 abitanti e negozi) e alimentato con i rifiuti termici dell'impianto di depurazione dell'Aire a Ginevra.

Parole chiave: rete termale lacustre, free cooling, free heating, accumulo di calore sublacustre stagionale, correzione della temperatura invernale della rete di acqua potabile, pompa di calore, GeniLac, Ginevra.

Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement Olivier Epelly, ex Directeur de l'Office cantonal de l'énergie de Genève et ancien collègue, pour m'avoir salutairement informé de l'appel à projets « *Out the box Rethinking* » de l'Office fédéral de l'énergie ; sans qui j'aurais simplement ignoré *l'appel* et le projet ULISSE n'aurait pas été le 1^{er} lauréat subventionné parmi 77 propositions.

Je remercie aussi Reto Camponovo et Gilles Trisconne, par qui l'HEPIA a pu être l'indispensable « institut hôte » du projet, sans oublier les précieux conseils éclairés du laboratoire LECEA dont ceux de Peter Gallinelli et de ses collègues. Un grand remerciement aux professeurs, Alain Dubois, Jean-François Rubin, Jeremy Olivier, Roland Rozsnyo et Zsolt Vecernyes, pour les échanges fructueux comme, la simulation numérique, les courants sous-lacustres (seiches) ou encore la réaction des pêcheurs... Et merci aussi à Daniel Bello Mendes de s'être attelé pour son travail de master sur la simulation numérique de la Maquette expérimentale du Réservoir ULISSE.

Un remerciement à Gilles Ottaviani (maître d'ouvrage Thermique des Services Industriels de Genève) et à Marcel Rüegg (Directeur, relations académiques et institutionnelles des SIG), par qui j'ai pu accéder aux données essentielles du projet Genilac (*Vaisseau Amiral* des Réseaux Thermo Lacustres en Suisse) et qui m'a servi d'exemple d'application du système ULISSE. Merci aussi à Stanislas de Froment de FOAMGLAS Suisse (isolant en verre cellulaire) et Mario Sappupo de Georg Fischer Systèmes de Tuyauteries (Suisse) AG.

« *The Solution of the Pollution is NOT the Dilution* »

Lucien Borel, Professeur de Thermodynamique à l'EPFL de 1954 à 2007

Table des matières

Objet.....	2
Résumé.....	3
Abstract.....	4
Zusammenfassung.....	5
Riassunto.....	6
Remerciements.....	7
1 Introduction : Défi/déficit de la Transition Energétique Suisse 2050	13
1.1 Impacts du Changement Climatique sur les besoins énergétiques des bâtiments	13
1.2 Assainissement énergétique du bâti ($\approx 1/2$ des besoins énergétiques globaux)	14
1.3 Un facteur incontournable sous-estimé :	14
1.3.1 L'évolution de la température du Réseau public d'Eau Potable (REP)	14
1.3.2 L'évolution du Mix Chauffage Ambiant / Eau Chaude Sanitaire (ECS)	15
1.4 Ressources d'énergies renouvelables, intermittence, stockage	15
1.5 Développement de l'énergie solaire photovoltaïque et l'éolien	16
1.6 La Suisse manquera 9 TWh d'énergie électrique au semestre d'hiver 2050	16
1.7 Potentiel de développement hydroélectrique	17
1.7.1 Impact du réchauffement climatique sur l'hydroélectricité	17
1.7.2 Le maintien de l'énergie nucléaire ne ferait qu'accentuer le stress hydrique sur les cours d'eau lié au réchauffement climatique	18
1.8 Ressources hydrothermiques lacustres	19
1.8.1 Potentiel thermique (1/3 des besoins nationaux de « Fraicheur » & « Chaleur »)	19
1.8.2 Développement des Réseaux Thermiques	20
1.8.3 Réseaux Thermo Lacustres	21
1.8.3.a Performances énergétiques saisonnières	21
1.8.3.b Limites environnementales de l'exploitation thermique des lacs.....	22
2 Synthèse du système ULISSE associé au free heating CORSAIRE	24
2.1 Origine du projet ULISSE et CORSAIRE - <i>Et état de l'art</i>	25
2.2 Précurseur d'un réservoir thermique lacustre flottant	27
2.3 Organisation de l'étude exploratoire ULISSE.....	28
3 Les Réseaux Thermo Lacustres Genevois GLN et GeniLac	29
3.1 Impacts de la température de l'eau du lac	29
3.1.2 Impact hydraulique (volume d'eau lacustre).....	29
3.1.3 Impact thermodynamique (performance COP des PAC).....	30
3.2 Bilan énergétique global du système GeniLac seul (sans ULISSE ni CORSAIRE)	32
3.2.1 Remarques & Considérations liminaires.....	33

3.2.2	Quid de l'intégration de « l'appoint gaz »	33
3.2.3	Flux énergétiques et hydrauliques initiaux pour GeniLac, en l'État Climatique et d'Efficiace Énergétique du Bâti – Actuel (ECEEB-A)	34
3.2.4	Remarques : COPac ou COPsys ?	34
3.2.5	Volume, Débit et Puissance hydrauliques initiaux Estival (free cooling) en ECEEB-A.....	35
3.2.6	Volume, Débit et Puissance hydraulique Hivernal (Chauffage + ECS), ECEEB-A	36
3.2.7	Conséquence de l'État Climatique et d'Efficiace Énergétique du Bâti en 2050	37
4.1	Impact PAC à l'État Climato Efficiace Énergétique du Bâti- Actuel (ECEEB-A)	39
4.2	Impact hydraulique à ECEEB-A	40
4.3	Conséquence de l'Extension du réseau GeniLac avec ULISSE à ECEEB-2050	41
5	Association du <i>free heating</i> CORSAIRE avec ULISSE au RTL GeniLac	42
5.1	Principe de fonctionnement.....	42
5.2	Perte thermique du REP et qualité sanitaire de l'eau déglacée en hiver	42
5.3	Usage de l'eau potable et interaction énergétique avec le bâti	44
5.3.1	Évolution saisonnière de la demande d'Eau Chaude Sanitaire (ECS)	44
5.4	Contribution de ULISSE avec le free heating CORSAIRE au réseau RTL	46
5.4.1	Variante d'intégration du free heating dans le bâtiment	46
5.5	Résumé et conclusions préalables pour le Réseau Thermo Lacustre GeniLac	48
5.6	Liaison du réseau RTL Genilac aux réservoirs ULISSE	51
5.6.1	Isolation thermique de la conduite de liaison	52
5.6.2	Calcul de la déperdition thermique de la conduite d'adduction	52
5.6.3	Transport, immersion et pose de la conduite d'adduction sur le fond lacustre	52
5.6.4	Investissements contenus et pérennisés pour GeniLac par ULISSE et CORSAIRE	54
6	Potentiel national d'implantation et d'économie d'électricité par ULISSE et CORSAIRE	55
6.1	Potentiel national d'ULISSE et CORSAIRE en « interne » (via le RTL)	55
6.2	Potentiel national de CORSAIRE Externe (via le REP hors RTL ou régions lacustres)	57
6.3	Potentiel national d'économie d'électricité et d'investissement par ULISSE et CORSAIRE.....	57
6.4	Aspects environnementaux et de cohabitations.....	59
6.4.1	Emplacement	59
6.4.2	Genre et quantité des matériaux utilisés.....	59
6.4.3	Interactions avec le lac	60
6.4.4	Cohabitations avec les usagers du lac (navigation, pêche)	62
7	Réservoir ULISSE : constitution, fonctionnement et coût financier.....	64
7.1	Enveloppe du Réservoir.....	64
7.2	Fonctionnement du Réservoir (cycle de chargement & déchargement).....	65
7.2.1	Processus du Chargement Estival (CE)	65

7.2.2	Processus de Déchargement Hivernal (DH)	66
7.2.3	Impact sur les débits et les performances d'ULISSE avec et sans CORSAIRE	66
7.3	Captage d'eau tempérée et chargement/déchargement du réservoir ULISSE	67
7.3.1	Problématiques liminaires	67
7.3.2	Eutrophisation lacustre	67
7.3.3	Encrassement et Colmatage des crépines d'aspiration d'eau lacustre	67
7.3.4	Captage des blooms phytoplanctoniques dans le Réservoir ULISSE	67
7.3.5	Dispositif de captage d'eau en zone épilimnion tempérée et de stockage ULISSE	68
7.3.6	Alimentation d'énergie des groupes motopompes	69
7.3.7	Obturateurs hydrauliques et clapets de dégazage	70
7.3.8	Répartition du système de captage des Réservoirs ULISSE	71
7.4	Ancrage du Réservoir type ULISSE	72
7.4.1	Mise en œuvre des ancrs hélicoïdales Marine Flex (40 ans d'expériences)	73
7.5	Robot nettoyeur de l'enveloppe du Réservoir type ULISSE	74
7.6	Coût d'investissement financier du/des réservoir(s) ULISSE	75
7.6.1	Comparatif avec des grands systèmes de stockage hydrothermique	75
7.6.2	Emprise de terrain du champ de capteurs thermiques et du bassin de stockage	76
7.6.2	Quid d'un réservoir type ou d'un réseau de (300) Réservoirs inédits ULISSE ?	78
7.7	Récapitulatif de comparaison d'ULISSE avec des solutions alternatives	79
8	Analyse de forme et dimensionnelle du Réservoir type ULISSE	80
8.1	Forme hyperbolique transversale de l'enveloppe	80
8.1	Points remarquables (B, C, E, F)	82
8.2	Extrémités demi-hyperboloïde du Réservoir	83
8.3	Longueur, Surface et Circonférence du Réservoir type ULISSE	83
8.4	Impacts de la température et de la densité de l'eau sur le Réservoir ULISSE	85
8.4.1	Forces d'Archimède et de traction sur l'enveloppe	85
8.4.2	Pression hydrostatique sur l'enveloppe	85
8.4.3	Propriétés des matériaux constitutifs de l'enveloppe du Réservoir ULISSE	85
8.4.4	L'isolation thermique de l'enveloppe hyperbolique du Réservoir ULISSE	86
8.4.5	Procédure et organisation des essais hydrostatique sur l'isolation	87
8.4.6	Conclusion des essais hydrostatiques	89
8.4.7	Protection contre l'abrasion du verre cellulaire	90
8.5	Éléments de jonctions de l'enveloppe	91
8.6	Analyse du transfert de chaleur par l'enveloppe du Réservoir ULISSE	92
8.6.1	Généralité	92
8.6.2	Conductance des pavés isolants (verre cellulaire)	93

8.6.3 Conductance thermique linéique de la zone de jonction des bandes de l'enveloppe (Ctjon).....	96
8.6.4 Utilisation de la conductivité thermique de l'enveloppe :.....	98
9 Maquette d'essais du Réservoir ULISSE	99
9.1 Agencement général de la Maquette	99
9.2 Platine d'alimentation hydraulique de la Maquette.....	101
9.3 Thermocouples de mesures des températures	102
9.4 Reproduction des pertes thermiques à la base du Réservoir (fond lacustre)	105
9.5 Constitution et Calibration des thermocouples type K	106
9.5.1 Constitution des thermocouples type K et leurs fixations	106
9.5.2 Temps de réponse des thermocouples avec leurs fixations	106
9.5.3 Calibration des thermocouples	107
9.5.4 Caractéristiques des thermocouples utilisés	107
9.5.5 Détails de la procédure de calibration des Thermocouples TC16 à TC21.....	110
10 Facteur d'Échelle Temporelle (FET) du Réservoir réel vs Maquette	112
10.1 Analyse dimensionnelle	112
10.3 Observations réelles sur la Maquette.....	116
10.4 Remarque : Manteau isolant temporaire amovible.....	117
10.5 Exemple de cycle complet sur la Maquette (essai du 20.12.2022, Annexe 1.8)	118
10.6 Bilan énergétique du Réservoir réel et de la Maquette	119
10.6.1 Considérations liminaires	119
10.6.2 L'établissement des pertes thermiques est fait selon 3 approches différentes :	119
10.6.3 Modèle théorique.....	119
10.6.4 Calculs théoriques pour le Réservoir réel type ULISSE	120
10.6.5 Calculs théoriques pour la Maquette.....	122
10.6.6 Bilan théorique et expérimental des pertes thermiques du Réservoir et de la Maquette	123
10.7 Simulation numérique du Réservoir type ULISSE et de la Maquette	125
10.7.1 Généralités.....	125
10.7.2 Méthode et maillage pour la simulation numérique	126
10.7.3 1 ^{ers} résultats de la simulation numérique de la Maquette	127
11 Suite : « Feuille de route » du Projet ULISSE & CORSAIRE	129
A. Pour la partie ULISSE :	129
Proposition.....	129
Objectifs	129
Paramètres thermiques principaux EPFL-UNIL sans et avec ULISSE :	130

Observation physique environnementale du Réservoir Pilote d'ULISSE.....	131
B. Pour la partie free heating CORSAIRE :.....	131
Proposition.....	132
12 Conclusions générales et suite	134
Constat	134
Proposition.....	134
Approche et méthodologie et résultats de l'étude exploratoire du projet ULISSE.....	136
Suite	136
13 Références bibliographiques	137
Annexes 1 : Expérimentations réelles sur la Maquette ULISSE.....	140
1) 29 juillet 2022 : 1 ^{er} essai d'injection d'eau chaude dans la Maquette.....	140
2) Essai du 03 août 2022 : Chargement thermique « lent » de la Maquette d'ULISSE.....	141
3) Essai du 27 septembre 2022 : (début du travail de master de M. Daniel Bello)	143
4) Essai du 03 octobre 2022.....	144
5) Essai du 03 novembre 2022 (chargement avec manteau isolant)	146
6) Essai du 24 novembre 2022 : Charge et décharge thermique complète Maquette.....	149
7) Essai du 19 décembre 2022 : Charge et décharge thermique complète Maquette	152
Phase de Chargement Estival (SE)	152
Phase de Stagnation Automnale (SA)	153
Phase de Déchargement Hivernal (DH).....	153
8) Essai du 20 décembre 2022 : Charge et décharge complètes Maquette avec grille	155
Phase de chargement thermique (CE) :	155
Phase de Stagnation Automnale (SA) :	157
Phase de Déchargement Hivernale (DH) :.....	157
9) Essai du 21 décembre 2022 (matin) : Cycle complet Maquette avec grille + feutre	159
10) Essai du 21 décembre 2022 (après-midi) : Cycle complet de la Maquette + feutre.....	160
11) Essai du 5 janvier 2023 : Cycle thermique complet de la Maquette avec feutre	161
Annex 2 : Mesure de la conductance hydrothermique de l'enveloppe du Réservoir ULISSE.....	162
Annexe 3 : Analyse d'un voile de cloisonnement hydrothermique.....	164
Annexe 4 : Analyse préliminaire des risques liés aux courants lacustres menaçant l'intégrité structurale d'ULISSE.....	167
Annexe 5 : Simulation of an Under Lake Infrastructure for Capture and Storage of Solar Energy (ULISSE), COMSOL Conference Munich 2023 [66]	175

1 Introduction : Défi/déficit de la Transition Énergétique Suisse 2050

Face aux changements climatiques, la Suisse a élaboré sa Stratégie Énergétique qui vise la “neutralité” carbone pour 2050 et au préalable la “neutralité nucléaire” pour 2035 [1]. Compte tenu de l’urgence et de la situation actuelle vis à vis des objectifs, sa *Transition Énergétique* doit s’activer. Si elle implique la substitution des énergies fossiles, émettrices de gaz à effet de serre (GES), par 584 PJ d’énergies renouvelables sans GES, elle doit gérer les **9 TWh de déficit structurel et hivernal de son principal “vecteur intermédiaire” qu’est l’électricité**.

La Stratégie Énergétique Suisse 2050 est basée en grande partie sur l’assainissement énergétique des bâtiments avec le recours quasi généralisé de Pompes à Chaleur (PAC) pour le chauffage et la climatisation, nécessitant 1/3 d’énergie électrique, auquel s’ajoute l’électrification de la mobilité, celle de l’industrie (décarbonation) et l’arrêt du nucléaire (2035); le tout **sous la menace de l’exclusion de la Suisse du *Clean Energy Package* de l’UE [1.1]**, qui restreindrait l’importation hivernale d’électricité et pourrait déstabiliser le réseau Suisse.

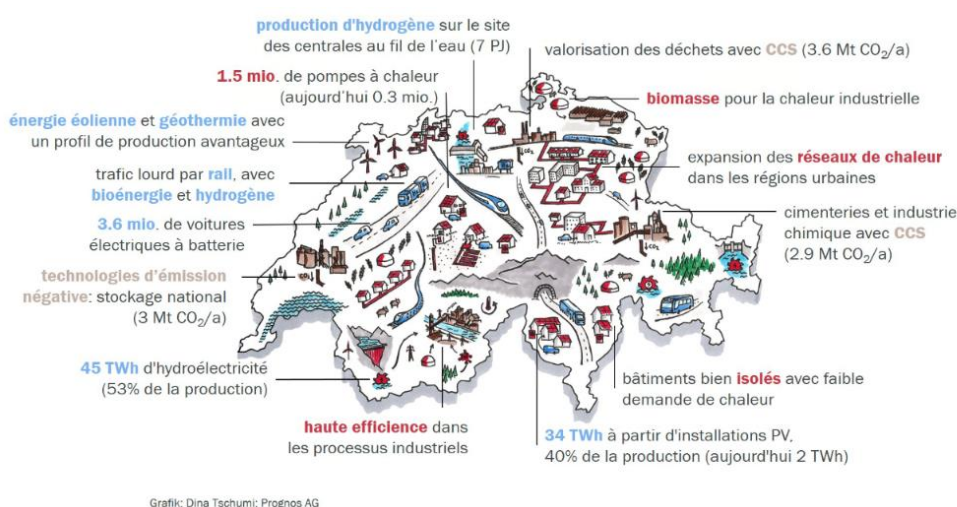


Figure 1.1 : Office fédéral de l’énergie OFEN, Perspectives énergétiques 2050+ Rapport succinct, Novembre 2020

1.1 Impacts du Changement Climatique sur les besoins énergétiques des bâtiments

L’étude *ClimaBau – BFE 2017, [3]* montre qu’entre les périodes « 1980-2009 » et « 2045-2074 », la température du Plateau Suisse augmentera en moyenne de 2°C et (en l’état actuel de l’efficacité énergétique) les besoins surfaciques (par m²) du Chauffage des bâtiments résidentiels réduiront « passivement » de 20 à 30 % (Fig. 1.2) (hors Eau Chaude Sanitaire, ECS). Par contre, ceux du refroidissement (Climatisation) augmenteront de manière exponentielle (+48 % D-J froid en 2050) pour atteindre la moitié des besoins de chaleur utile au chauffage.

Nonobstant cela, l’impérative réduction « active » des émissions de GES passera certes par celle de la Climatisation mais surtout par l’amélioration de l’efficacité du Chauffage, pour atteindre une réduction énergétique du bâti de 40 à 60 % d’ici 2050.

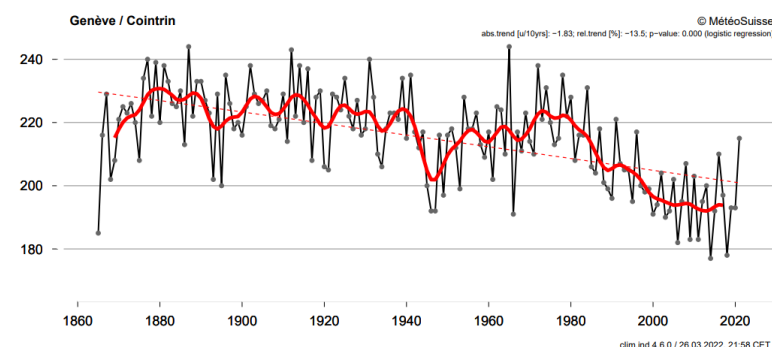


Figure 1.2 : Évolution du Nombre de Jours de Chauffage (NJC₁₂) annuel à Genève Cointrin de 1866 à 2021 : -1.83 J/décennie, -13.5%. (Source MétéoSuisse).

1.2 Assainissement énergétique du bâti (≈ 1/2 des besoins énergétiques globaux)

L'énergie finale est d'environ 750 PJ/an en 2020 et devra baisser à près de 520 PJ/an en 2050 (selon le scénario Zéro base, fig. 1.3). Elle a globalement deux usages à parts égales : des besoins équivalent « moteur » (processus divers, mobilité, transport) et des besoins équivalent « chaleur » (processus, CA & ECS). L'assainissement énergétique des bâtiments passe principalement par l'amélioration de l'isolation (bénéficiant au chaud & froid) et le recours massif aux Pompes à Chaleur (PAC) pour fournir de l'ordre de **200 PJ/an en 2050** (figure 1.3) d'énergie-chaleur finale destinée au Chauffage Ambiant (CA) et à la production d'Eau Chaude Sanitaire (ECS) [1.2].

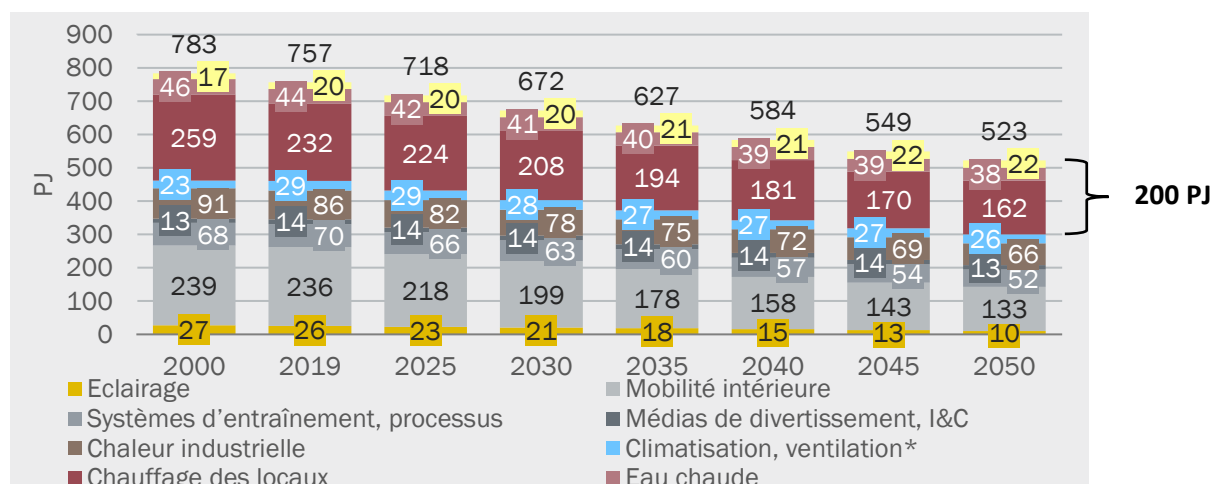


Figure 1.3 : Évolution de la consommation d'énergie finale par application (Consommation intérieure sans la consommation du trafic aérien international, scénario ZÉRO base, en PJ). **Le chauffage des locaux et l'ECS représenteront 200 PJ en 2050** Source : Prognose AG / TEP Energy GmbH / INFRAS AG 2020 [1.2].

L'alimentation électrique desdites PAC nécessitera à minima 19 TWh/an (COP = 3). À cela s'ajoutera 17 TWh/an pour la mobilité électrique et 20 TWh/an pour remplacer l'énergie nucléaire en 2035 (1/3 de la production nationale). En 2050 il faudra produire 39 TWh d'électricité renouvelable en plus des 45 TWh hydroélectriques, pour une consommation annuelle de 76 TWh « nette » (sans pompage d'accumulation, scénario Zéro base) [1.2].

Afin de maîtriser la consommation électrique, la Climatisation estivale peut d'abord recourir préventivement aux protections solaires passives, à la ventilation naturelle nocturne et au-delà au « free cooling » (sans PAC) ainsi que la régulation par « consigne glissante » en fonction de la température extérieure, ce qui pour la dernière mesure est plus difficilement applicable (acceptable) pour le Chauffage.

1.3 Un facteur incontournable sous-estimé :

1.3.1 L'évolution de la température du Réseau public d'Eau Potable (REP)

En l'état actuel du parc immobilier, la production d'ECS représente annuellement 1/4 à 1/3 soit près de 30 % de l'Indice de Dépense de Chaleur (IDC), qui est le besoin annuel de chauffage + ECS par m² de Surface de Référence Énergétique (SRE). À Genève, des IDC de 600 – 800 MJ/ m².an sont encore courant mais depuis le 1^{er} septembre 2022, au-delà de 450 MJ/ m².an, un assainissement énergétique du bâtiment est exigé.

Dans le détail, le besoin de chaleur pour l'ECS évolue inversement avec la température (saisonnière) du Réseau public d'Eau Potable (REP). Sur le Plateau Suisse, ce dernier évolue de façon sinusoïdale avec une amplitude d'environ 10°C (minimum à 5-6°C en hiver) [54]. Cette chute hivernale de la température du REP conduit naturellement à un **doublement relatif (en moyenne vs été) du besoin hivernal d'énergie-chaleur pour l'ECS, voir aussi de la consommation électrique des lave-linges et lave-vaisselles** (figure 1.4 ci-dessous).

Pour un bâtiment de *Haute Qualité Énergétique* (HQE), l'ECS peut représenter près de la moitié de l'IDC et, comme **les lave-linges et lave-vaisselles qui utilisent 70 à 80 % de l'électricité pour chauffer l'eau**, être impactée significativement par l'évolution saisonnière de la température du Réseau public d'Eau Potable (REP) !

Fig.4: Evolution (en °C) de la température de l'eau froide à l'entrée du bouilleur.

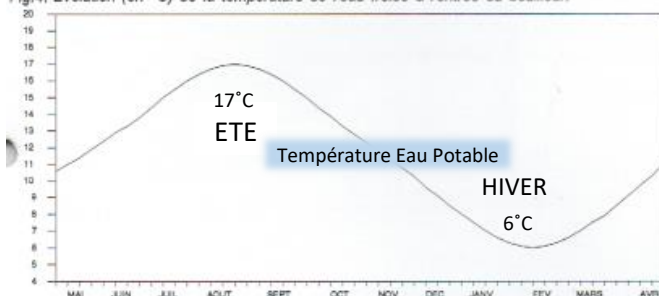


Fig.6: Evolution (en %) de la demande d'énergie hebdomadaire pour les besoins en eau chaude. Evolution du taux de couverture solaire hebdomadaire en fonction du rayonnement global et de la demande d'énergie avec 0,5 m² de capteur par personne.

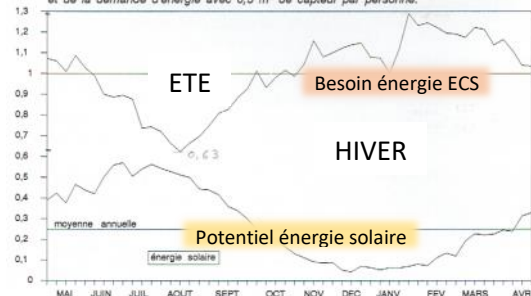


Figure 1.4 : Évolution saisonnière de la température de l'eau froide à l'entrée des immeubles (Fig. de gauche) et du besoin d'énergie (Fig. droite), pour le besoin d'eau chaude sanitaire (ECS), mesurés sur plusieurs immeubles locatifs (1000 logements), pour l'évaluation des installations solaires de préchauffage de l'ECS. Ville de Genève / Service de l'Energie, juin 1990. [43,46]

1.3.2 L'évolution du Mix Chauffage Ambiant / Eau Chaude Sanitaire (ECS)

Avec le réchauffement climatique (hivers moins froids) et le futur assainissement énergétique des bâtiments (diminuant les besoins spécifiques d'énergie), les besoins de chaleur pour le Chauffage Ambiant (CA) auront « doublement » tendance à diminuer significativement.

Par contre, ceux pour l'ECS le seront dans une moindre mesure, du fait qu'ils dépendent davantage des habitudes des utilisateurs (quand bien même ceux-ci peuvent aussi évoluer). De plus, la stratégie de réduction de la consommation électrique passera aussi par l'abandon du Chauffage Ambiant électrique - et celui du Chauffe-Eau électrique (par effet Joule) ainsi que par l'alimentation des appareils électroménagers (lave-linge et vaisselles) inévitablement avec l'ECS « thermodynamique » (par PAC) et évidemment aussi avec le solaire thermique.

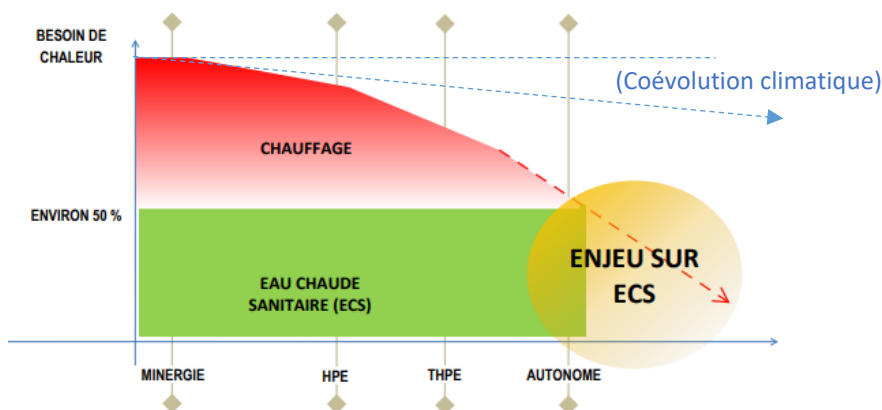


Figure 1.5 : Évolution du ratio (MixC/E) de besoin de chaleur pour le Chauffage ambiant et l'Eau Chaude Sanitaire (ECS), en fonction de l'assainissement énergétique des bâtiments (performance intrinsèque). Source : Riedweg et Gendre SA

Il y a donc là un énorme enjeu ou impact sur le mode de production de l'Eau Chaude Sanitaire (ECS) !

1.4 Ressources d'énergies renouvelables, intermittence, stockage

Les ressources d'énergies renouvelables (d'origine solaire ou primaire), locales et indigènes, sont principalement, la biomasse, l'éolien, solaire-thermique/-PV, hydraulique, et l'aérothermie ou atmosphérique. Ce dernier conditionne (température atmosphérique) tout particulièrement les besoins de Climatisation et de Chauffage. Du fait de leurs variabilités de production, chacune de ses ressources a sa spécificité propre dont une importante est son potentiel de stockage à court et long terme pour être disponible à la demande.

L'énergie électrique en est le « vecteur intermédiaire » (chaîne de transmission), certes de prédilection pour son usage mais dont le stockage est limité (à grande échelle et longue durée comme l'hydraulique). Outre sa capacité de stockage, l'hydrogène est aussi un vecteur énergétique intermédiaire soumis à l'efficacité de la (longue) chaîne des multiples transformations énergétiques (primaire-finale-utile) !

En dehors du potentiel thermo-solaire de surface et de stockage à faible profondeur, la géothermie profonde est quant à elle aussi une source d'énergie « renouvelable » (à échelle humaine) et a priori neutre en *Gaz à Effet de Serre* (GES). La géothermie mérite d'être développée mais nécessite d'importants investissements prospectifs (à risques) et de précautions techniques à prendre (sismiques, pollution aquifère et phréatique, etc.).

1.5 Développement de l'énergie solaire photovoltaïque et l'éolien

La Stratégie énergétique Suisse 2050 prévoit tout particulièrement le développement du photovoltaïque (PV), avec une production annuelle spécifique de 34 TWh et qui nécessitera l'installation de l'ordre de 150 km² de panneaux PV (31 GWp), l'équivalent de 1/4 de la surface du lac Léman, pour un coût de 41 milliards de CHF (source : *scenario AWS (Anreiz WinterStrom) : BFE-D-CE6 13401/311*).

Naturellement environ 1/3 de la production solaire (PV et thermique) est située durant le semestre d'hiver (PV ≈ 11 TWh) et le stratus hivernal sur le Plateau Suisse en n'est qu'en partie la cause, alors que c'est là où se situe l'essentiel des toitures disponibles pour le PV et à proximité immédiate de son usage final/utile et urbain.

Dès lors, certains évaluent un potentiel théorique de 30 km² d'installations PV (surface du lac de Brienz), environ le double de la surface déjà installée en Suisse (et 4'438 éoliennes ≈ x 100 du nombre actuel, soit 4 TWh en 2050 dont 2/3 en hiver), dans les vallées alpines et zones de montagne ; ceci en négligeant la contrainte économique (source : *EPFL-CRYOS/WSL*).

Dès lors, avec le développement massif du photovoltaïque (PV), l'excédent estival (au besoin supplémentaire de la Climatisation) et à défaut d'un stockage intermédiaire saisonnier suffisant, risque de conduire au recours paradoxal et absurde du « *solar peak-sheaving* » (écrêtage du PV) pour ne pas surcharger le réseau électrique !

Malgré l'augmentation attendue du besoin global de Climatisation estivale, la demande d'électricité hivernale demeurera proportionnellement plus importante (chauffage, ECS). Elle sera encore exacerbée (prix) par une disponibilité photovoltaïque (et solaire-thermique) moindre ainsi que par la part complémentaire non renouvelable (pénalité GES) et conjoncturellement limitée d'une importation d'énergie primaire ou électrique.

Les pays voisins de la Suisse sont aussi dans une démarche de « décarbonisation », avec une stratégie similaire et un déficit structurel (et naturel) d'électricité hivernale et n'auront dès lors moins à vendre en la matière...

1.6 La Suisse manquera 9 TWh d'énergie électrique au semestre d'hiver 2050

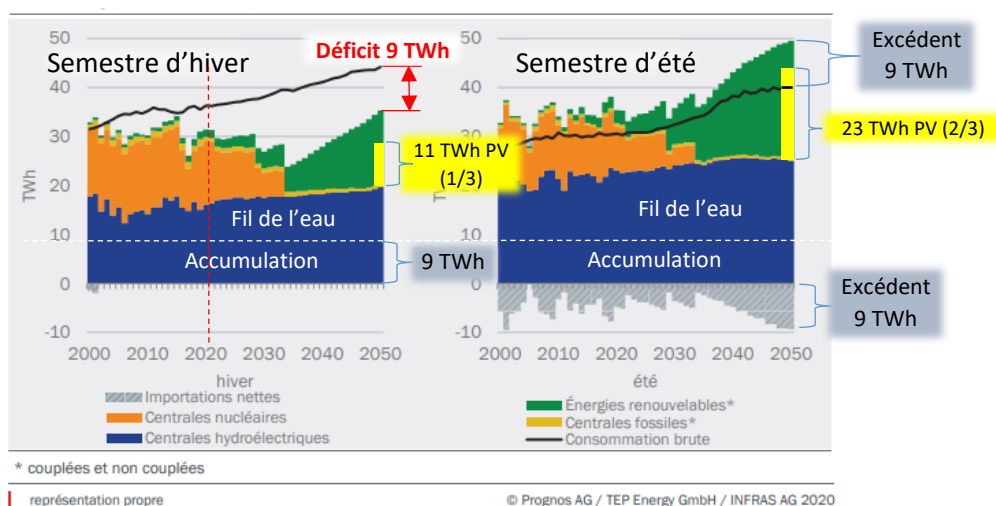


Figure 1.6 : Évolution de la production brute d'électricité pendant le semestre d'hiver et d'été dans le scénario ZERO base, variante stratégique "bilan annuel équilibré en 2050, en TWh (source : OFEN EP2020+)

Sur une consommation électrique hivernale de 45 TWh en 2050, il y aura un déficit de 9 TWh (Fig. 1.6). Cela correspond à l'ensemble de la capacité actuelle des barrages suisses d'accumulation hydraulique ; ceci avec un double taux de remplissage annuel, puisque les centrales à accumulation ont produit en 2020, à parts égales, 9 TWh en été et 9 TWh en hiver (déduction du pompage d'accumulation) [15].

1.7 Potentiel de développement hydroélectrique

La Suisse compte 200 grands ouvrages d'accumulation et 222 retenues d'eau sous la surveillance de l'OFEN.

Le volume total d'accumulation d'eau des barrages est de 4 milliards m^3 , pour une surface de retenue de 456 km^2 (éq. 4,5 % du volume et 80 % de la surface du lac Léman). En extrapolant simplement les 6 millions de m^3 de béton non armé du barrage-poids de la Grande Dixence, la construction des barrages aurait nécessité 50 millions de m^3 de béton et/ou de remblai ; sans compter les ouvrages annexes (p. ex. creusement des galeries d'adduction) et les centrales hydroélectriques pour disposer notamment des 9 TWh électricité en hiver.

Le potentiel de développement de l'hydroélectricité serait encore de 1 à 3 TWh (OFEN 2012b), soit au mieux 1,5 TWh en semestre d'hiver. C'est de l'ordre de la capacité du Complexe hydroélectrique de Grande Dixence (CGD), qui produit 0,5 TWh en été et 1,5 TWh en hiver, soit 20 % de l'énergie électrique d'accumulation de la Suisse.

Pour combler le déficit hivernal de 9 TWh, il faudrait l'équivalent de 6 CGD (6 x 1,5 TWh en hiver), comprenant chacun en plus de 3 barrages (Ferpècle, Z'Mutt et Grande Dixence), 100 km de galeries et conduites d'adduction, les 3 centrales hydroélectriques (Puissance totale installée : 2 TW), postes de transformation, etc. [16.1].



Figure 1.7 : Barrage-poids de la Grand-Dixence, 6 millions m^3 de béton non armé (source : <https://www.swissdams.ch>)

Pour quel coût et combien d'objets potentiels d'oppositions et de procédures juridiques d'arbitrages sur fond de zones protégées ? Selon l'étude de l'Association des entreprises Électriques Suisses (AES/VSE) [16], le coût d'investissement pour les nouvelles constructions de centrales à accumulation est de 4'750 CHF/KW, soit 9,5 milliards de CHF pour une seule unité de capacité de production équivalente à de celle du CGD, alors qu'il en faudrait 6 pour l'hiver !

1.7.1 Impact du réchauffement climatique sur l'hydroélectricité

Avec le réchauffement climatique, nombre de lacs de montagnes se forment (cumulant 50 à 60 km^2 de surface d'ici la fin du 21^e siècle (source : *Forschungsbericht NFP 61, vdf Hochschulverlag AG, 2013*). La modification attendue des apports hydrauliques des barrages (en partie due au **recul et disparition des glaciers d'alimentation**) impliquera que l'augmentation de la capacité d'accumulation (dont les projets de rehaussement de barrages existants et de nouveaux) devra être compensée par de l'énergie électrique pour leur remplissage. Il constituera une baisse globale de la productivité hydroélectrique « nette » (déduction de l'énergie de pompage d'accumulation : 4,5 TWh soit 11 % de la production hydraulique « brute » de 40,6 TWh en 2020). C'est encore égal à la moitié de la capacité actuelle des barrages suisses (Source : OFEN 2021).

1.7.2 Le maintien de l'énergie nucléaire ne ferait qu'accentuer le stress hydrique sur les cours d'eau lié au réchauffement climatique

Pour des raisons technico-économiques, une centrale nucléaire fonctionne généralement en « ruban » toute l'année, donc également en semestre d'été, hormis les arrêts planifiés pour maintenance [18, 19]. **La centrale nucléaire suisse de Leibstadt (1'220 MW-é, 9 TWh/an) est refroidie par une tour « humide » (aéroréfrigérante) en circuit semi fermé. Durant le seul semestre d'été, elle rejette l'équivalent de 2/3 de son énergie « primaire » (combustible nucléaire) sous forme de vapeur d'eau avec environ 14 millions de m³ d'eau extrait du Rhin (0.75 à 1 m³/s).** La centrale nucléaire de Gösgen (fig. 1.9) n'est pas en reste avec près de 10 millions de m³ d'eau évaporées de l'Aar à la même période.

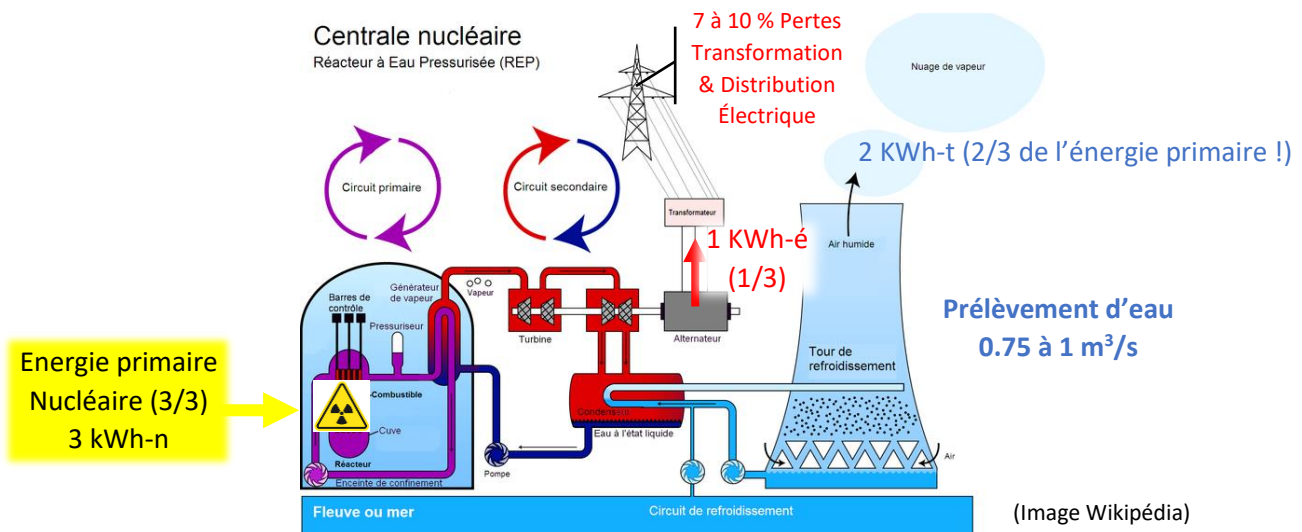


Figure 1.8 : Schéma de principe d'une centrale/Réacteur nucléaire à Eau Bouillante (REB) et refroidissement par une tour aéroréfrigérante alimentée par un fleuve ou la mer (circuit semi-fermé)

Avec l'accroissement de la sécheresse estivale, exacerbée encore avec les canicules plus récurrentes, les besoins accrus d'eau pour d'autres usages (priorisation), dont notamment l'agriculture, deviendront (sont déjà) critiques. Dès lors, **les centrales thermoélectriques (nucléaires mais aussi à flamme, charbon, fioul ou gaz) qui ne pourront pas fonctionner sans eau de refroidissement** (en valorisant leurs rejets thermiques en cogénération), seront contraintes d'arrêter ou de réduire fortement leur production en semestre d'été et ne seront donc plus économiquement « compétitives » et a fortiori également moins présentes ou disponibles en semestre d'hiver.

Du reste, en dehors d'autres considérations (financière, sécurité, combustible étranger, déchet/rejet nucléaire et chimique, démantèlement ou encore bactériologique tel que les **légionnelles dans les bassins des tours aéroréfrigérantes** [19.2]), la France et l'Allemagne, nos principaux importateurs d'électricité hivernale, sont faces aux mêmes problèmes hydriques [19, 19.1] et avec le même engagement climatique que la Suisse...



Figure 1.9 : Centrale nucléaire à eau pressurisée (BWR) de Gösgen sur l'Aar (900 MWé) avec son panache de vapeur d'eau (0.75 m³/s : 10 millions m³ d'eau pris sur l'Aar en semestre d'été)

1.8 Ressources hydrothermiques lacustres

1.8.1 Potentiel thermique (1/3 des besoins nationaux de « Fraicheur » & « Chaleur »)

La Suisse compte 171 villes et communes urbaines et pratiquement autant (175) de lacs, dont 15 ont plus de 10 km² et totalisent 1233 km² de surface avec des profondeurs dépassant souvent les 60 m. Le quart de la population suisse (≈ 9 M hab.) est située à proximité directe de ces 15 grands lacs et pourrait potentiellement être raccordée à un système de Réseau Thermo Lacustre (RTL) à basse température pour des besoins de « froid » et de « chaud ».

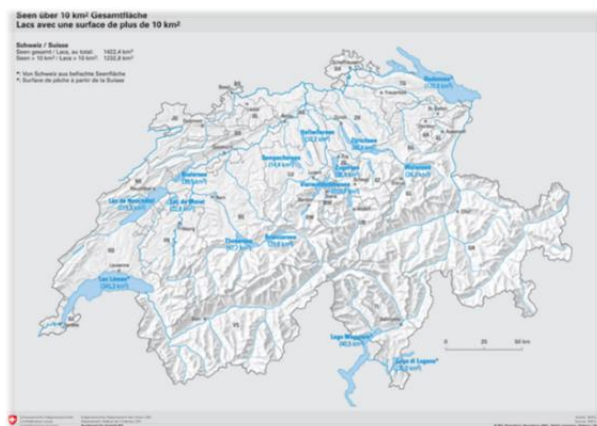


Fig.1.10 : Les 15 grands lacs Suisses de plus de 10 km²

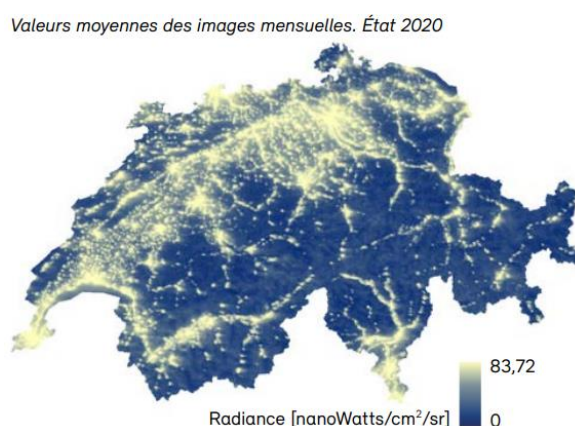


Fig. 1.11 : Image satellitaire des émissions lumineuses (2020)

C'est sans surprise que l'on observe, par l'image des émissions lumineuses (fig. 1.11 ci-dessus), que la majorité de la population Suisse réside, travaille et consomme de l'énergie sur le Plateau, là où se situent aussi les grands lacs (figure 1.10). Source : *Évolution du paysage* © OFEV/WSL 2022.

Selon une étude de l'Eawag et de l'EPFL [27], la demande totale d'énergie-chaleur finale autour des lacs est estimée à 25 PJ de froid et 135 PJ de chaleur, soit près de 1/3 des besoins nationaux actuels (70 PJ de froid & 360 PJ de chaleur en 2020). La demande autour des rivières est quant à elle de 37 PJ de froid et 205 PJ de chaleur ; certaines communes étant assignées à la fois à un lac et à une rivière. Le potentiel hydrothermique lacustre (grands cercles sur les figures 1.12 ci-dessous) identifié par l'Eawag, l'institut de recherche sur l'eau des EPF, est plusieurs fois celle de la demande locale de froid & chaud. Elle peut avoisiner les besoins nationaux précités.

<https://thermdis.eawag.ch/fr>

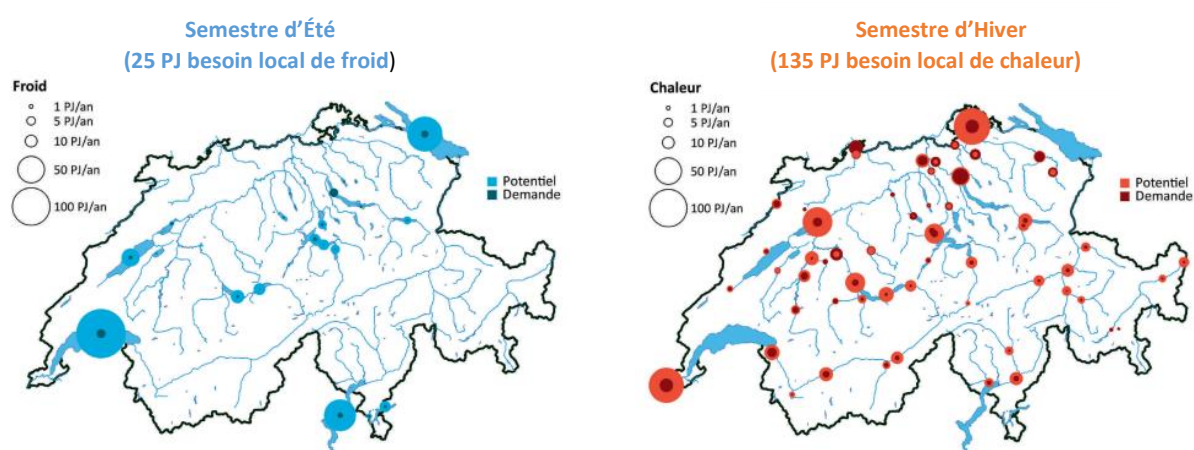


Figure 1.12 : Potentiel & Demande thermique des lacs suisses d'extraction de chaleur (hiver) et de froid (été) Source : *Utilisation thermique des eaux superficielles* A. Gaudard ; M. Schmid, Eawag ; A. Wüest, Eawag et EPFL, AQUA & GAS N° 6

Depuis 2021, sur la base des données de l'Eawag, le service de géo-information de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) a créé une nouvelle carte interactive permettant de visualiser ce potentiel thermique de chauffage et de climatisation des lacs et rivières suisses. <https://opendata.swiss/fr/dataset/potenzial-der-seen-und-flusse-fur-warmeentzug-und-warmeeinleitung> [27.1]

1.8.2 Développement des Réseaux Thermiques

La Stratégie énergétique Suisse 2050 prévoit le développement massif des Réseaux Thermiques de chaleur et de froid. Ils sont adaptés pour fournir les besoins correspondants, à grande échelle et de façon économique, avec des sources d'énergies renouvelables et/ou de valorisations de rejets thermiques. Ceci pour autant que la densité spatiale de la demande de chaleur soit suffisante [12,13]. Une charte a été signée en ce sens par les villes, les communes, les cantons et la Confédération visant à accélérer le développement des réseaux thermiques [14].

Les bâtiments d'habitation ou administratifs sont ceux qui se prêtent le mieux à un réseau thermique, qui plus est à basses températures favorables à la production et la distribution d'énergie-chaleur. Une zone présentant une densité thermique égale ou supérieure à 700 MWh/a par hectare est considérée comme appropriée. Ce sont naturellement les moyennes et grandes agglomérations urbaines, bien visibles sur la carte de la Suisse ci-dessous.

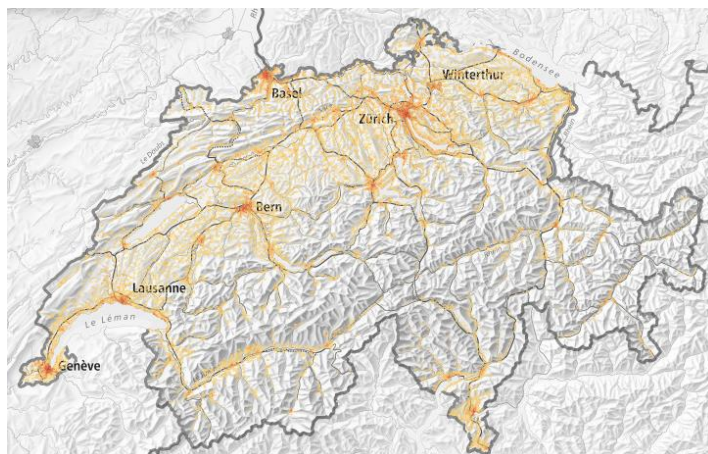


Figure 1.13 : Localisation pour la Suisse de la demande de chaleur représentée en tant que densité thermique par hectare et mise en évidence selon une palette de couleurs (source : OFEN, Statistique des bâtiments et des logements -StatBL- 2014)
<https://opendata.swiss/fr/dataset/thermische-netze-nachfrage-wohn-und-dienstleistungsgebäude>

Le potentiel des installations de chauffage et de refroidissement à distance (Réseaux Thermiques) varie selon le point de vue technique, écologique et économique. Le livre blanc « Le chauffage à distance en Suisse » de 2014 montre que le potentiel thermique dépasse largement les besoins de chaleur [13].

Source de chaleur	Potentiel thermique technique	Attribution géographique*	Part possible de la chaleur à distance future
Rejets de chaleur de la valorisation des déchets	5,7 TWh/a	3,6 TWh/a	21%
Rejets de chaleur industriels	3,6 TWh/a	Non attribué	Non attribué
Rejets de chaleur des stations d'épuration des eaux usées	7,7 TWh/a	1,9 TWh/a	11%
Utilisation de la chaleur de l'eau souterraine	12,2 TWh/a	1,9 TWh/a	11%
Lacs	97 TWh/a	5,1 TWh/a	29%
Cours d'eau	21,3 TWh/a	1,8 TWh/a	10%
Bois	20,5 TWh/a	1,7 TWh/a	10%
Géothermie	70 TWh/a	1,3 TWh/a	8%
Total	238 TWh/a	17,3 TWh/a	100%

* Des zones présentant un besoin de chaleur élevé au niveau local (densité de raccordement suffisante) ont été attribuées au potentiel technique

➡ CORSAIRE !

➡ ULISSE !

Tableau 1.14 : Potentiel technique des Réseaux Thermiques (Chauffage à Distance, CAD) selon le « livre blanc »

On observe (pour ULISSE) que les lacs représentent 39 % du total du potentiel technique (29 % de la part possible du Chauffage à Distance, CAD futur) mais pas nécessairement écologique et/ou économique. De même, pour les rejets thermiques basses températures des STEP (Station d'épuration des eaux usées) qui représentent 3,2 % du potentiel total et 11 % de part du CAD, potentiellement exploitable via le free heating CORSAIRE.

1.8.3 Réseaux Thermo Lacustres

Illustré à la figure 1.15 ci-dessous, le refroidissement et le chauffage des bâtiments avoisinants les lacs nécessitent des Réseaux Thermo Lacustres (RTL), pour capter l'eau « calo-porteuse », la transporter et la distribuer aux agglomérations urbaines desservies et finalement en boucle fermée la restituer aux lacs.

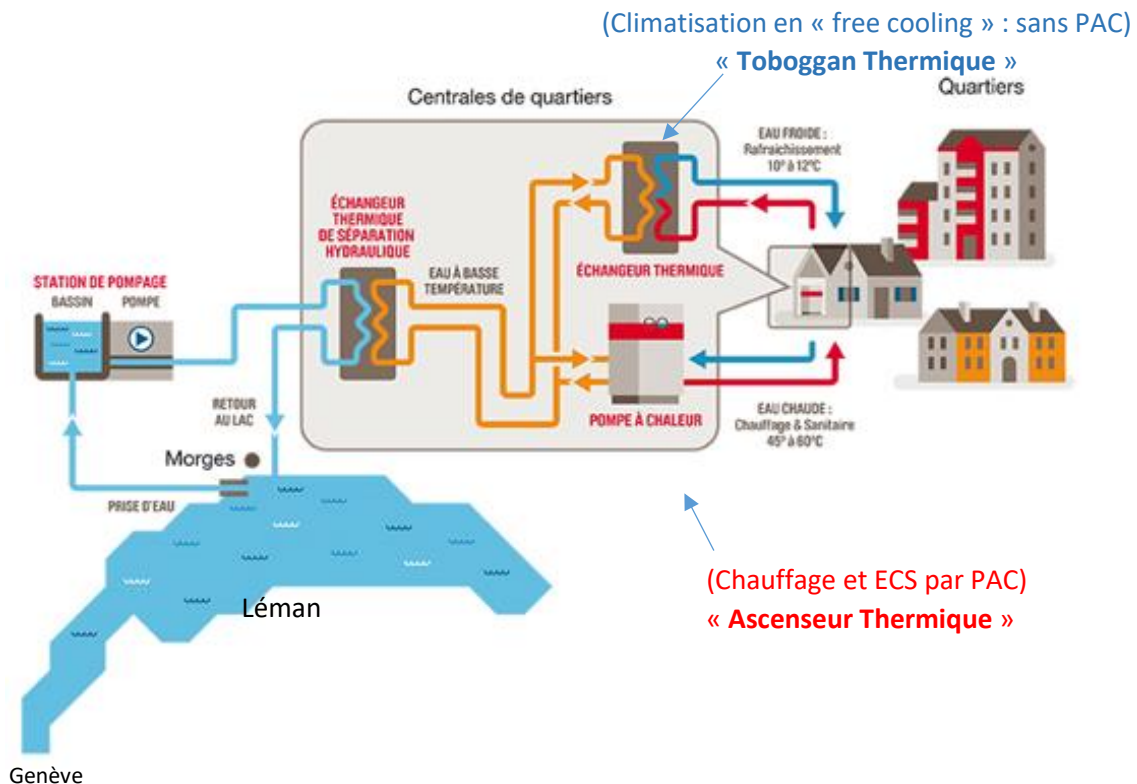


Figure 1.15 : Exemple de Réseau Thermo Lacustre (RTL) avec MorgesLac de la ville de Morges (VD)

1.8.3.a Performances énergétiques saisonnières

Les RTL tels que ceux avec le Léman (GLN-GeniLac à Genève, MorgesLac, EPFL-UNIL, etc.), sont très efficaces pour la Climatisation estivale en "free cooling" (sans pompes à chaleur PAC), ceci avec l'eau froide (5-7°C) pompée au fond du lac (zone *Hypolimnion*) et agissant comme un véritable « **toboggan thermique** ». Son Coefficient de Performance électrique COP peut atteindre 18 (prévision GeniLac), soit 5,5 % d'électricité pour introduire dans le Léman l'énergie-chaleur extraite des bâtiments en été (contre un $COP \leq 3$ pour un climatiseur conventionnel).

Par contre, le Chauffage hivernal des bâtiments est 4 à 5 fois moins efficace que ladite Climatisation estivale en *free cooling*. Ceci par l'usage inévitable des PAC pour extraire la chaleur du lac et rehausser tel un « **ascenseur thermique** » sa température à celle nécessaire pour les besoins de chauffage et de production d'ECS. La température hivernale au niveau du captage de l'eau dans les lacs impacte directement le Coefficient de Performance (COP) des PAC mais aussi celui (plus faible qu'en été) de l'écart de température (ΔT) aller-retour exploitable de l'eau du lac, imposant aussi un conséquent débit de pompage et de circulation de l'eau dans les RTL. Au final ceci contribue à accroître la consommation d'électricité hivernale des RTL [7-11, 58, 59].

En effet, en saison hivernale la température des lacs est minimale et quasi homogène sur toute la profondeur. De plus, au fond elle est quasi stable toute l'année. Le cycle thermique caractéristique commence par l'état isotherme en hiver, suivi d'un mélange complet ou partiel vers la fin de l'hiver, puis par la stratification de mai à octobre qui culmine en été. Cette évolution saisonnière de la température est bien illustrée par l'exemple des 4 lacs des figures 1.16 ci-dessous, dont on peut remarquer qu'indépendamment de leurs tailles, en été tous les lacs ont un écart thermique (ΔT) d'environ 15K entre le sommet (Épilimnion) et le fond (Hypolimnion) [27.1]. Pour compléter, sont également indiqués leurs volumes ainsi que le *Potentiel d'Injection et d'Extraction de Chaleur* pour les besoins respectivement de Climatisation et de Chauffage (PIC & PEC en TWh/an) selon l'Eawag.

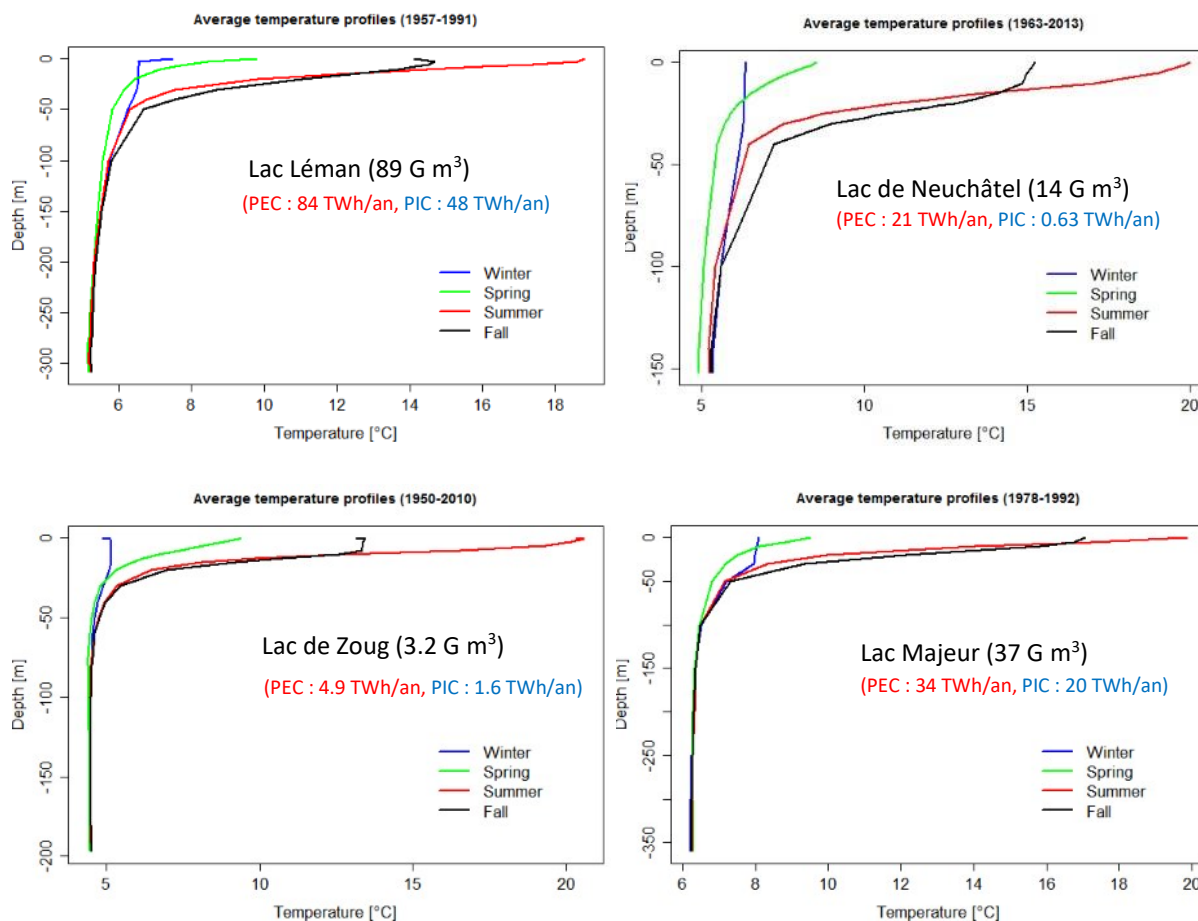


Fig. 1.16 : Évolution saisonnière de la température de 4 lacs en fonction de la profondeur (OFEN, Eawag) [27.1]

1.8.3.b Limites environnementales de l'exploitation thermique des lacs

En raison du réchauffement climatique, la température moyenne de surface de nos lacs a augmenté d'environ deux degrés au cours des 40 dernières années. Due aux hivers moins froids, **les eaux de surfaces plus chaudes réduisent la profondeur du mélange annuel de l'eau et donc leur oxygénation vitale à la vie aquatique [27].**

Si le potentiel thermique des lacs dépasse de plusieurs fois les besoins locaux (Tableau.1.12), afin de ne pas impacter davantage l'écosystème aquatique, l'utilisation thermique lacustre est limitée et réglementée (*Ordonnance fédérale sur la protection des eaux, OEaux*), principalement au niveau de la profondeur et la température de prise et de restitution de l'eau.

La modification maximale de la température (ΔT) pour l'injection et l'extraction de chaleur est respectivement de 0.5 et 1°C à la restitution de l'eau au lac **[OEaux]**. Elle est destinée à éviter d'augmenter la « *Thermocline* » (zone de transition thermique) en chauffant les couches de surface (zone *Épilimnion*) en été (apport de chaleur provenant des besoins de froid et de Climatisation) ou de refroidir les couches profondes (*Hypolimnion*) en automne et en hiver (pour les besoins de Chauffage ambiant et de production d'Eau Chaude Sanitaire), ce qui peut finalement retarder/empêcher ledit mélange en profondeur favorable à la réoxygénation et la circulation des nutriments, débouchant à l'asphyxie et l'eutrophisation des lacs **[27, 31].**

Un des défis de la Stratégie Énergétique Suisse 2050, fondée somme tout sur un impératif environnemental, est donc notamment de développer le potentiel thermo lacustre, pour nos besoins de « froid » et de « chaud », tout en PROTÉGEANT nos lacs contre les effets néfastes du Réchauffement Climatique généralisé¹ [35] !

¹ <https://www.nationalgeographic.fr/environnement/2021/07/le-changement-climatique-asphyxie-les-lacs>

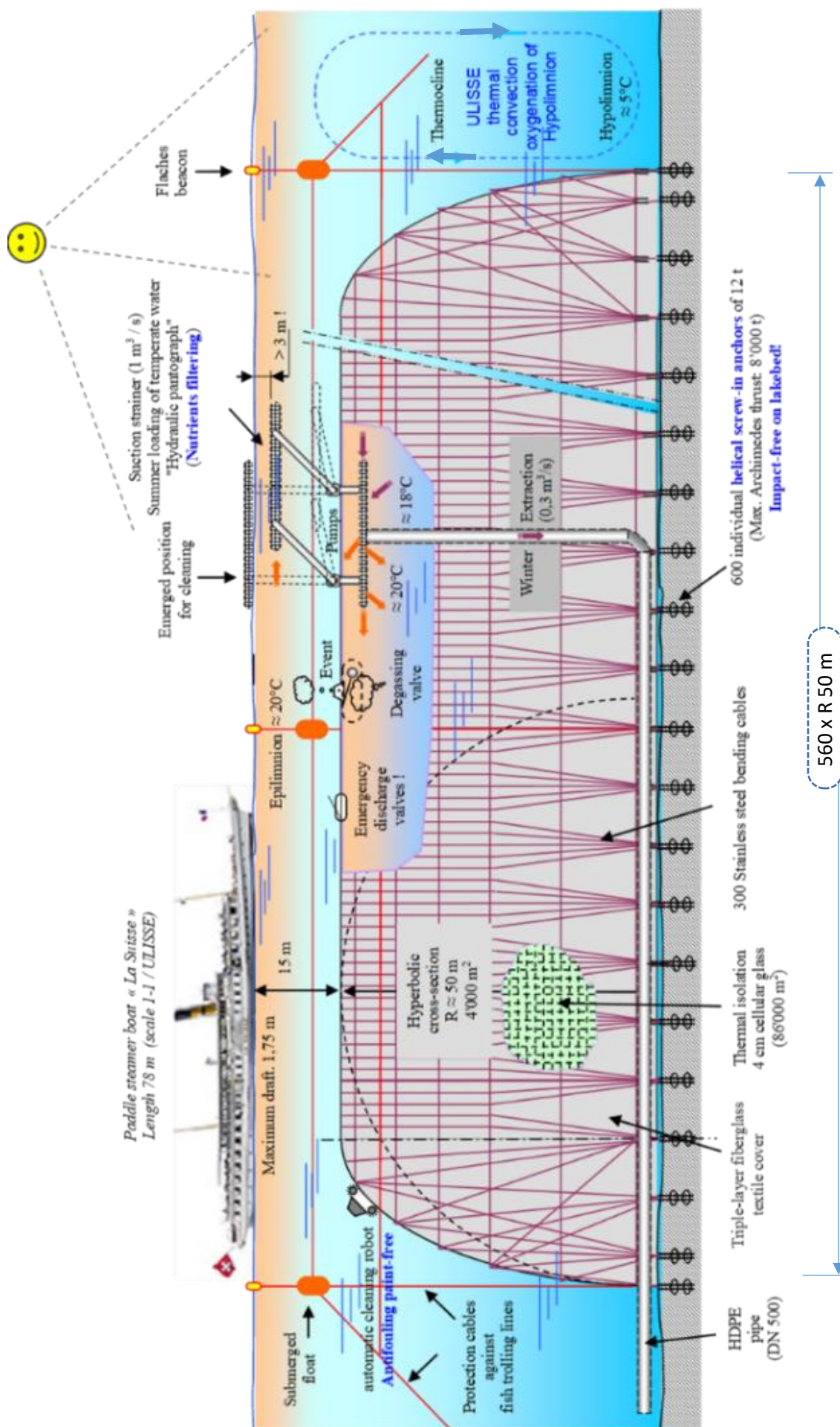


Fig. 2.0 : Schéma longitudinal tronqué de principe d'un Réservoir type d'ULISSE de 2 M m³ (Bateau de la CGN à l'échelle)
L'agencement des câbles de cintrage et d'ancrage peut être significativement différent.

2 Synthèse du système ULISSE associé au free heating CORSAIRE

L'étude exploratoire du système ULISSE-CORSAIRE est précédé ici de la Synthèse et de l'Origine du projet d'ensemble, pour ensuite aborder l'étude de son impact énergétique appliquée en exemple au RTL GeniLac.

Booster des Réseaux Thermo Lacustres

Pour pallier aux limites des réseaux thermo lacustres (RTL), le système ULISSE propose en premier lieu de fournir une source lacustre de chaleur hivernale à environ 20°C, au lieu d'ordinaire à 5-6°C [54]. Ceci va d'une part doubler l'efficacité des pompes à chaleur (PAC), réduisant de moitié leur consommation électrique et d'autre part, avec l'augmentation (x5) de la densité énergétique extractible de l'eau (J/M³), réduire d'un facteur 5 le débit d'eau en circulation dans les RTL, ce qui réduit de 96 % ($1-1/5^2$) les pertes de charge et donc également l'énergie électrique absorbée par les pompes hydrauliques.

Cette source de chaleur ULISSE est constituée de grands Réservoirs « tunnels » (longueur 560 m x 50 m de rayon transversal hyperbolique), ancrés sur les fonds lacustres, d'un volume de stockage unitaire de 2 millions m³ et d'une capacité thermique de 125 TJ chacun. Ces Réservoirs ULISSE sont chargés en été d'eau tempérée, soit issue de la couche supérieure du lac (*Épilimnion*) chauffée par le soleil, soit par des rejets de chaleur industrielle et de climatisation. Les pompes de chargement sont alimentées par de l'électricité photovoltaïque absorbant les pics de production estivale des installations photovoltaïques (PV) et évite le recours auxdits *peak-shavings* [17.2].

Le Free Heating CORSAIRE du Réseau public d'Eau Potable

La deuxième voie d'utilisation de l'eau tempérée fournie par les Réservoirs ULISSE ou d'autres rejets thermiques est de corriger (5 à 10°C) la chute hivernale de la température des Réseaux public d'Eau Potable (REP) par le procédé CORSAIRE en *free heating* (sans PAC). Tous les REP sont potentiellement concernés par le « free heating » qui peut fournir 30 % de l'énergie-chaleur pour l'Eau Chaude Sanitaire (ECS), réduire la consommation d'électricité des lave-linges/vaisselles raccordés à l'ECS et augmenter l'efficacité électrique des RTL [42 à 52].

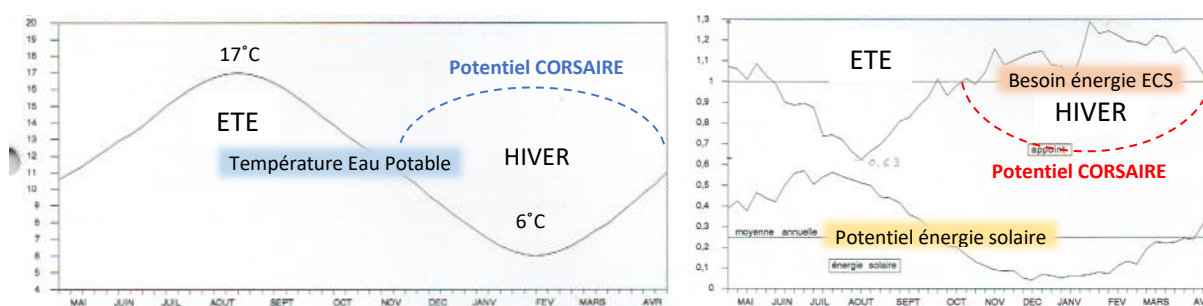


Figure 2.1 : Potentiel et impact de la correction de la chute hivernale de température du REP via le free heating CORSAIRE

Potentiel national

Le concept/projet ULISSE, avec environ 300 Réservoirs répartis de façon invisible dans les 15 grands lacs suisses et en association avec le *free heating* CORSAIRE (y compris hors régions lacustres), pourrait fournir près de 60 PJ ou 30 % des 200 PJ de besoins nationaux d'énergie-chaleur pour le chauffage ambiant et l'ECS. Ceci permettrait d'économiser 3 TWh-é d'électricité brute en semestre d'hiver (1/3 des 9 TWh de déficit hivernal d'électricité ou l'équivalent du double de la production hivernale du complexe hydroélectrique de Grande Dixence : 1,5 TWh).

Impacts environnementaux (Protection lacustre contre le Réchauffement Climatique)

Les courants de convection externes, induits par la déperdition thermique au travers de l'enveloppe biocompatible (verre textile et cellulaire) des Réservoirs ULISSE, peuvent améliorer la circulation des nutriments et l'oxygénation du fond lacustre, protégeant l'écosystème aquatique contre l'eutrophisation et le réchauffement climatique. La présence des Réservoirs peut créer des niches écologiques protégées de la pêche et ainsi favoriser le développement de la faune aquatique. Le captage sélectif (filtration du phytoplancton) permettrait de réguler si besoin les « blooms » (efflorescences algales toxiques), de récupérer les GES et le CH₄ (usage énergétique). Le confinement de la chaleur captée dans les Réservoirs ferait baisser la température superficielle du lac, la perte d'eau par évaporation et augmenterait encore l'oxygène dissous dans l'eau [20 - 34].

2.1 Origine du projet ULISSE et CORSAIRE - Et état de l'art

- **Au lendemain de la Conférence de Rio 1992 (CNUED)**, le 20 octobre 1992 l'auteur proposa aux autorités locales le **projet VERTCAD** de « **Valorisation Exégétiques de Rejets Thermiques pour le Chauffage À Distance** », impliquant des sources du CERN et des installations industrielles du Canton de Genève et de France voisine. **Par rapport au réseaux thermiques traditionnels à eau surchauffée (130°C), c'est un concept avant-gardiste d'un réseau thermique (de moyenne à basse température) et à l'échelle régionale du « Grand Genève »** ou l'Agglomération Franco-Valdo-Genevoise. Toutefois, à l'exception du directeur général du CERN de l'époque, le Prix Nobel Carlo Rubbia, ce projet fut accueilli « fraîchement », au motif notamment qu'il faudrait « éventrer » 1 rue sur 2 à Genève pour raccorder les immeubles à ce réseau de Chauffage à Distance basse température (Fig. 2.2) ...



Fig. 2.2 : Proposition du projet transfrontalier franco-genevois VERTCAD (Valorisation Exégétiques des Rejets Thermiques pour le Chauffage À Distance de basse température), article de Pierre Ruetschi, Tribune de Genève, 30 novembre 1992.

- Pour contourner les objections, la thèse de master de l'EPFL de l'auteur (1995) avait pour objet la valorisation de rejets de chaleur du CERN (700 GWh-t ou 2,5 PJ) dans la **CORrection Saisonnière (hivernale ΔT : 5 à 10°C) de la température du Réseau d'Eau potable** du canton de Genève (*procédé CORSAIRE*) [43]. Sans stockage saisonnier de chaleur, ce « free heating » hivernal (sans PAC) du REP, implique *de facto* que ces rejets de chaleur soient produits lorsqu'ils ont une valeur d'usage, c.-à-d. durant le semestre d'hiver et donc le déplacement contraignant en été de l'arrêt annuel « shut down » des accélérateurs et des expériences du CERN.
- Comme alternative à cette dernière contrainte, l'auteur avait alors proposé un **dispositif complémentaire de Stockage Saisonnier Sous-Lacustre de Chaleur (S³-LC)** permettant de récupérer l'eau tiède de refroidissement du CERN durant le semestre d'été pour la valoriser durant la saison de chauffage (lorsque le CERN est normalement en « shutdown » des accélérateurs).

Précurseur du projet ULISSE, l'auteur a présenté sommairement ce concept élargi (Fig. 2.3 ci-dessous) à la 10^{em} Conférence générale de la Société Européenne de Physique (EPS) à Séville, Espagne, en septembre 1996 [44].

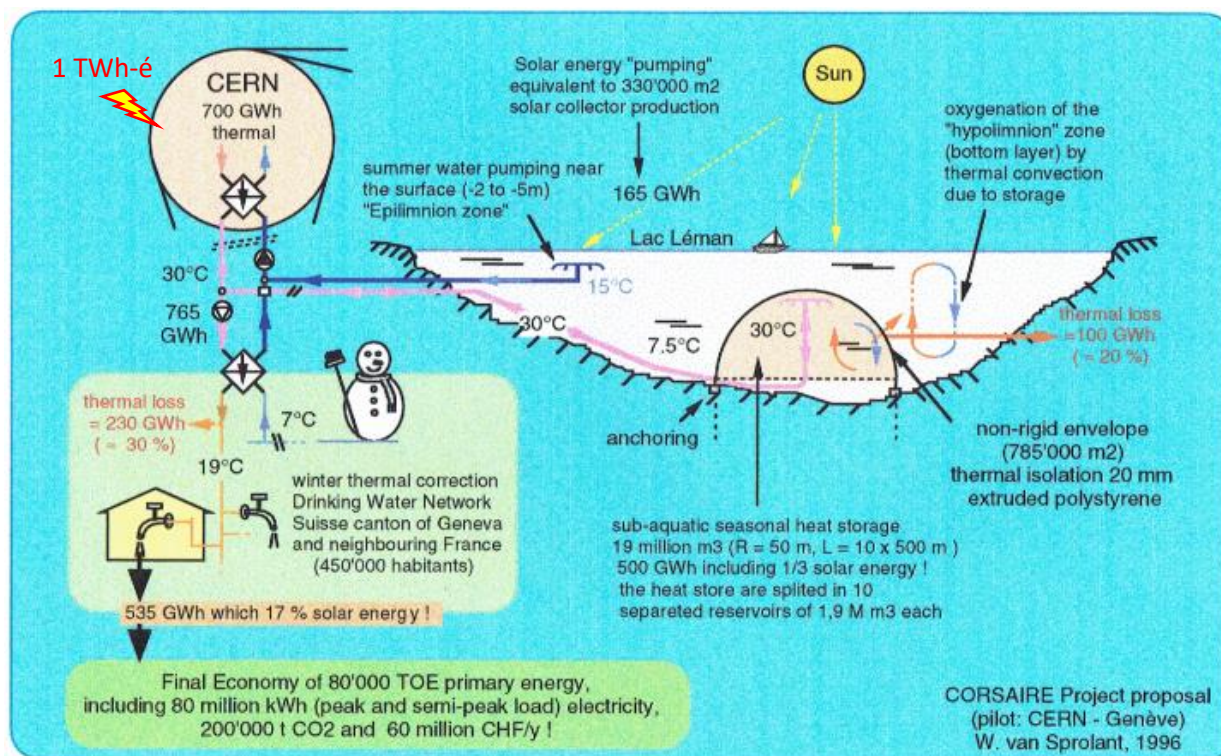


Figure 2.3 : Complément du S³-LC à l'étude de la valorisation des rejets thermiques du CERN (thèse de master EPFL 1995)
Contribution on the EPS 10 Trends in Physics, 10th General conference of the European Physical Society, Sevilla 1996

L'étude de base en question (travail de master EPFL 1995) du concept/projet CORSAIRE, de « free heating » (sans pompe à chaleur) du Réseau public d'Eau Potable (REP), montre un potentiel d'économie énergétique qui peut atteindre 10 % de l'IDC, *Indice de Dépense de Chaleur* (Chauffage ambiant et ECS) des immeubles d'habitation à l'échelle d'une ville (entière) ; ceci, sans construction d'un nouveau réseau thermique et en l'état actuel de l'assainissement et sans aucune intervention ou équipement supplémentaire sur les bâtiments [65] !

- Sous l'impulsion de l'Office cantonal de l'énergie (OCEN), **le projet CORSAIRE est inscrit au Plan directeur de l'Energie du canton de Genève (2001-2005)**. En novembre 2005, sous le pilotage de l'auteur initial du projet et financé par l'OCEN, débute le volet -1 de l'étude d'impacts pluridisciplinaires sur un immeuble pilote d'habitation mis à disposition par la Ville de Genève [46]. Hélas, 3 mois après son démarrage, elle est brusquement arrêtée, au motif d'une restriction budgétaire imprévue de l'OCEN ! Et depuis, le projet n'a plus été reconsidéré malgré l'ambitieux objectif énergétique de Genève (*Société 2'000 W sans nucléaire en 2050*) !

- Dans l'intervalle, **depuis 2006, le principe CORSAIRE est utilisé (en été !) dans la ville canadienne de Toronto** (3 millions d'habitants, 1/3 de la Suisse) avec son réseau hydrothermique lacustre de climatisation « *Deep Lake Water Cooling* » (DLWC) ! D'une capacité de 360 MW de froid, l'énergie thermique extraite de la climatisation est injectée dans le réseau public d'eau potable de Toronto via une batterie d'échangeurs de chaleur (fig. 2.4), exactement comme le procédé free heating CORSAIRE [51, 52, 53].

Depuis 2006 le DLWC de Toronto avec le lac Ontario est le plus grand système au monde de Climatisation thermo-lacustre (et talonné par GeniLac à Genève). Similaire au réseau RTL GeniLac à Genève, grâce au « free cooling », il permet d'économiser annuellement 90 GWh-é d'électricité et 1 million m³ d'eau, comparativement aux machines frigorifiques à compression et à eau perdue (gain d'électricité ≈ 80 %, source Enwave) [51,52,53].

Cependant, à l'opposé saisonnier du free heating CORSAIRE en semestre d'hiver, la chaleur de la Climatisation du système DLWC sert à « déglacer » ($\Delta T \approx 8$ K) le 1/4 du réseau d'eau potable de la ville de Toronto exclusivement en été.

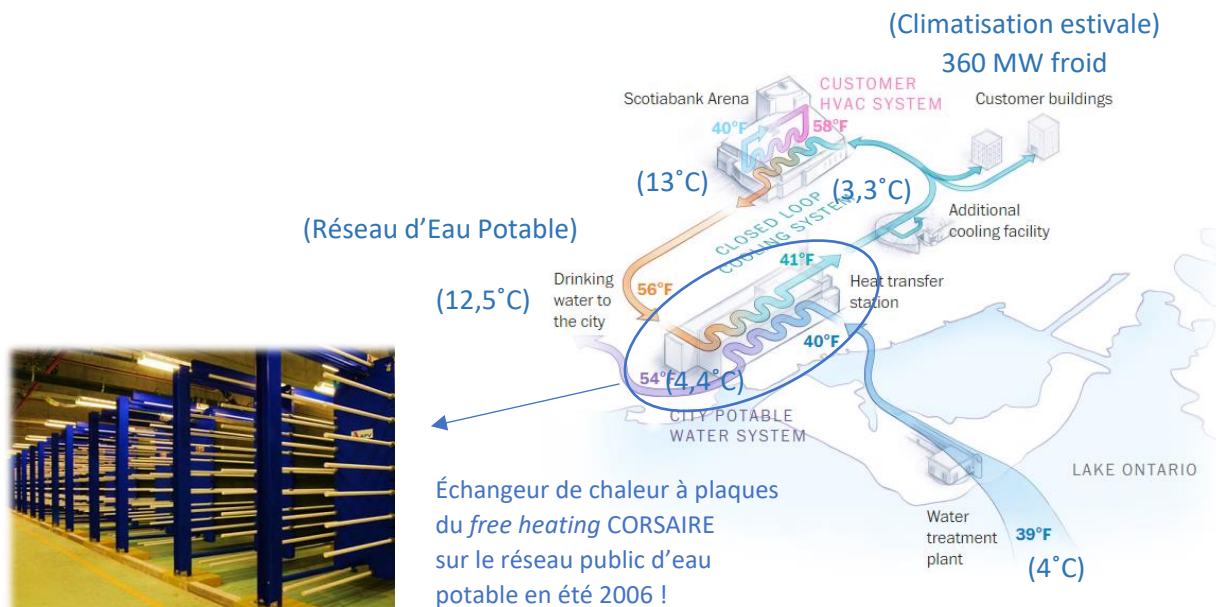


Figure 2.4 : schéma de principe du système de rafraîchissement lacustre de la ville de Toronto (2006), avec injection de l'énergie thermique via un échangeur de chaleur dans le réseau public d'eau potable (Enwave)

• **Finalement, en 2021 l'auteur propose le projet ULISSE** en réponse à l'appel à projet SOUR 1-2021 de l'OFEN et bénéficie ainsi d'un premier support financier pour la présente étude exploratoire du projet ULISSE.

2.2 Précurseur d'un réservoir thermique lacustre flottant

En 1980 le designer Suédois P. Margen a suggéré un réservoir d'eau chaude (90°C) flottant en surface d'un lac ou de la mer (figure 2.5 ci-dessous). Ce réservoir est constitué d'un caisson rigide isolé thermiquement, ouvert à sa base et muni de pontons flotteurs, le tout arrimé solidement avec des câbles à des blocs d'ancrage. Le caisson sort de façon variable au-dessus de la surface du plan d'eau en fonction de la quantité et de la température de l'eau dans le caisson (0,5 m à 90°C) [36, 37].

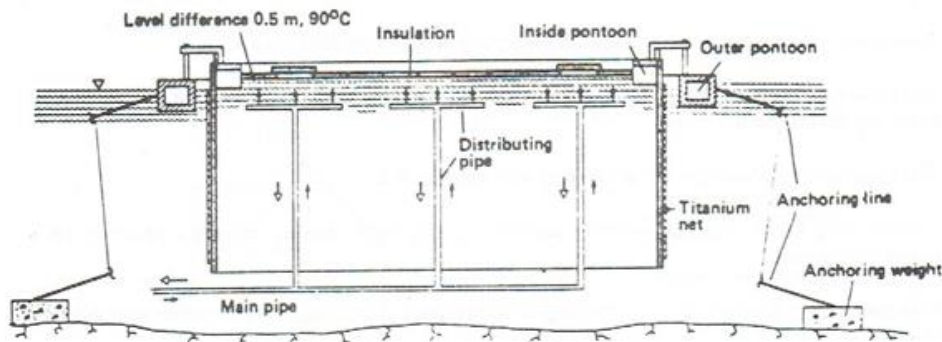


Figure 2.5 : Proposition du suédois P. Margen pour un caisson flottant d'eau chaude (1980), Source : SIA OFEN 1987, Guide to Seasonal Heat Storage, J-C. Hadorn [37]

Les sites potentiel doivent être très limités. Non seulement les riverains ne devraient pas apprécier l'impact visuel dans le paysage mais en plus, **ce dispositif sortant de l'eau comme un iceberg de façon variable constituerait un danger inacceptablement élevé pour la navigation**. De plus cette structure flottante subirait les remous des vagues qui peuvent déstabiliser et arracher le tout en cas de fort vent ou de tempête (les vagues dans le Léman peuvent atteindre des creux de 2 m).

L'implantation d'une telle structure, ne pouvant que difficilement se faire par grands fonds, serait cantonnée de façon rédhitoire, dans la zone côtière ou littorale (*beine lacustre*), là où se situe une grande partie de la flore (herbiers) et la faune lacustre. Ces derniers seraient directement en contact potentiel avec de l'eau brûlante, qui plus est pouvant être expulsée hors du caisson sous les remous et mouvements engendrés par les vents forts.

2.3 Organisation de l'étude exploratoire ULISSE

Pour rappel, les 3 principaux objectifs du concept ULISSE associé à CORSAIRE sont :

- 1) Améliorer l'efficacité électrique des Réseaux RTL potentiellement implantés dans les 15 grands lacs,
- 2) Protéger les lacs concernés contre le réchauffement climatique à l'aide des Réservoirs ULISSE,
- 3) Réduire l'impact énergétique négatif de la chute hivernale de la température du REP (CORSAIRE).

Dans le cadre du programme SOUR de l'OFEN, l'étude exploratoire du projet ULISSE réalisée à l'HEPIA comprend les points suivants :

- Analyse de la situation et le défi de la Stratégie Énergétique Suisse 2050,
- Proposition et synthèse du système ULISSE associé au *free heating* CORSAIRE, Historique et état de l'art,
- Étude structurelle, constitution matérielle et fonctionnement du réservoir type ULISSE,
- Réalisation d'essais de résistance du verre cellulaire (FOAMGLAS) sous pression hydrostatique,
- Analyse énergétique du système combiné ULISSE – CORSAIRE sur la base exemplaire du RTL GeniLac et du REP de Genève,
- Extrapolation des résultats de GeniLac au niveau national,
- Comparaison technico-économique avec des réseaux thermiques alternatifs, alimentés par des capteurs solaires thermiques et bassin terrestre pour le stockage saisonnier de la chaleur,
- Exploration des impacts environnementaux potentiels pour les lacs hébergeant des Réservoirs ULISSE.

Plus spécifiquement, l'établissement de l'efficacité du stockage saisonnier du Réservoir type ULISSE comporte les points suivants :

- Analyse du coefficient de transfert de chaleur de l'enveloppe du Réservoir ULISSE,
- Réalisation d'une Maquette expérimentale pour reproduire les différentes phases de fonctionnement,
- Établissement *du Facteur d'Échelle Temporelle (FET)* entre le Réservoir réel grandeur nature et la Maquette à échelle réduite.

Par ailleurs, l'établissement des déperditions thermiques se fait selon les 3 approches complémentaires :

- 1. Calculs selon un Modèle Théorique simplifié de la Maquette et du Réservoir grandeur nature,
- 2. Calculs basés sur les données acquises par l'Expérience sur la Maquette,
- 3. Simulation Numérique (COMSOL Multiphysics) de la Maquette et du Réservoir réel.

Finalement, l'étude propose une suite (Next Step) avec deux Pilotes et de Démonstration du système ULISSE et de CORSAIRE.

3 Les Réseaux Thermo Lacustres Genevois GLN et GeniLac

Le système « Genève-Lac-Nation » (GLN) est un Réseau Thermo Lacustre (RTL) à basse température fonctionnant avec l'eau du Léman et de l'électricité 100 % renouvelable. Il fournit principalement le rafraîchissement (80 % = 20 GWh-t/a) et le chauffage des bâtiments (20 % = 5 GWh-t/a), pour des Organisations internationales, des écoles et des habitats collectifs à Genève. Suite à son succès, les Service industrielles de Genève (SIG) construisent actuellement son extension « x 10 » (GeniLac) vers le centre-ville et le secteur de l'aéroport (fig. 3.1).

L'eau est captée dans le Léman à 45 mètres de profondeur, à une température d'environ 7°C en été et 5°C en hiver. Elle est ensuite acheminée jusqu'à une station de pompage (STAP du Vengeron), passe par un échangeur de chaleur (uniquement pour le secteur Aéroport en boucle semi-fermée), puis est transportée dans des conduites souterraines et lacustres jusqu'aux bâtiments raccordés. L'eau chargée de la chaleur extraite des bâtiments est ensuite restituée au lac et le Rhône en aval à une température d'environ 12°C. Ce système en « free-cooling » (sans PAC), avec un Coefficient de performance (COPsys) annoncé de 18, permet de réduire la consommation électrique (estivale) de 70 GWh-e soit de 80 % par rapport aux climatiseurs conventionnels (PAC inversées) fonctionnant avec un COP moyen de 2,8.

Ce Réseau Thermo Lacustre (RTL) permet aussi de chauffer les bâtiments raccordés, à l'aide des pompes à chaleur (PAC) en lieu et place des chaudières existantes fonctionnant aux énergies fossiles. À l'horizon 2035, GeniLac permettra de diminuer les émissions de CO₂ de 70'000 tonnes par an à Genève [7, 8, 9, 10, 11].

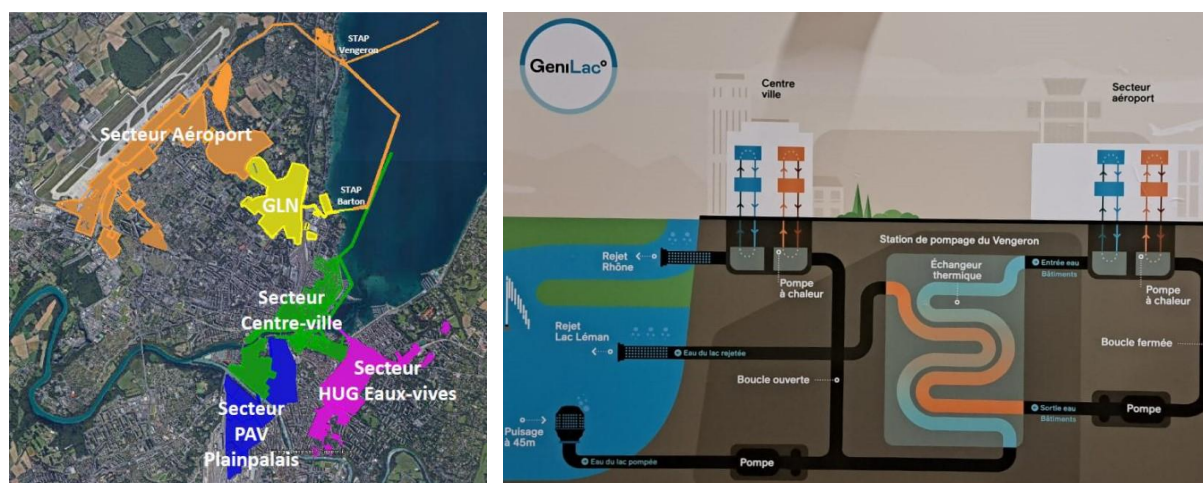


Figure 3.1 : Schémas de principe du rafraîchissement et du chauffage à distance GeniLac avec le lac Léman (Source : SIG)

3.1 Impacts de la température de l'eau du lac

Comme décrit précédemment, le rafraîchissement estival des bâtiments, en *free cooling* (sans pompe à chaleur), est très efficace avec une eau à environ 7-8°C pompée au fond du lac (zone hypolimnion) et restituée au lac à environ 12-13°C. Le différentiel de température puisage-retour ΔT est d'environ 5 K voire plus selon la zone épilimnion et la dispersion du rejet. Le ratio (COP) entre l'énergie-froid fournie et l'électricité du pompage de l'eau lacustre est annoncé à 18 !

Par contre et d'une manière générale, l'extraction de chaleur du lac pour le chauffage hivernal est plus complexe et moins efficace, principalement due à la réduction de l'écart de température disponible par le lac ($\Delta T \approx 3$ K) et qui est alors réduit de moitié à un tiers par rapport à l'été ainsi que l'impact sur l'efficacité des PAC.

3.1.2 Impact hydraulique (volume d'eau lacustre)

Pour une puissance thermique hivernale à extraire du lac, le plus faible écart de température hivernal versus l'été (ΔT : 3K vs. 5K) implique une augmentation inversement proportionnelle du volume de pompage et de circulation de l'eau. Ceci entraîne des pertes de charges proportionnelles (au carré) du débit et une augmentation correspondante de l'énergie absorbée par les pompes hydrauliques. Leur consommation électrique annuelle représente 1/4 de la totalité incluant celle des PAC. À cela s'ajoute une part d'énergie gravitationnelle liée à la dénivellation lac - réseau et qui n'est pas totalement récupérée par le turbinage de l'eau au retour vers le lac.

Ceci explique, en majeure partie, l'efficacité et la prédominance du rafraîchissement estival par rapport au chauffage hivernal via un Réseau Thermo Lacustre conventionnel. Le ratio typologique des bâtiments raccordés (ratio climatisation versus chauffage) est par exemple pour GLN de 4 tandis que celui de son extension GeniLac est de 0,9 soit pratiquement en équilibre avec le chauffage ou à parts égales.

3.1.3 Impact thermodynamique (performance COP des PAC)

D'autre part, le faible ΔT hivernal impacte négativement la performance des PAC (*Ascenseur Thermique*) pour le chauffage et peut même entraîner des risques de gel. Représenté par le schéma de la figure 3.2 ci-dessous, le Coefficient de performance (COP) d'une PAC est le rapport entre l'énergie-chaleur fournie « utile » $|Q|$ (chauffage Q_c ou froid Q_f) et l'énergie électrique absorbée W (Work) par le compresseur de la PAC et/ou de la pompe de circulation, pour transférer l'énergie-chaleur entre ladite « source froide » et ladite « source chaude ».

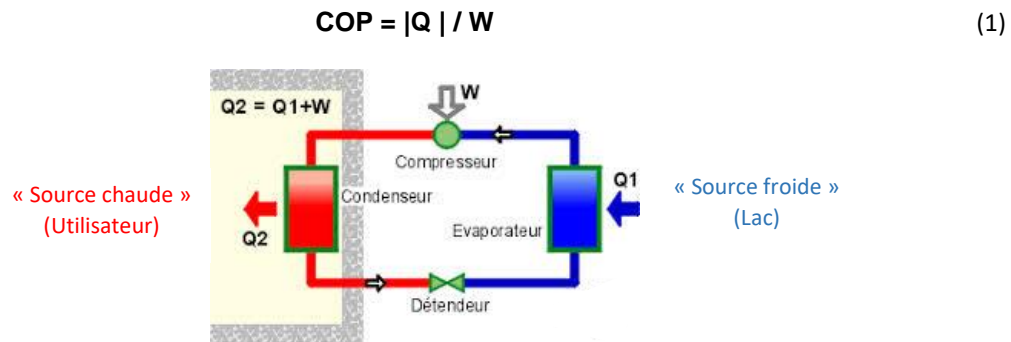


Figure 3.2 : Schéma de principe thermodynamique d'une pompe à chaleur (PAC) en mode « chauffage » (image Wikipédia)

Dans le cas d'une machine frigorifique ou de climatisation conventionnelle (à cycle thermodynamique de compression/détente du fluide), l'Évaporateur est dans le local (Utilisateur) et le Condensateur à l'extérieur, en l'occurrence côté Lac. Pour le chauffage c'est l'inverse.

Selon la 1^{ère} (conservation) et 2^{ème} (réversibilité) des lois de la thermodynamique, on peut définir que :

$$(Q_2) \text{ ou } Q_c = Q_f + W \quad \Rightarrow \quad W = Q_c - Q_f \quad (2)$$

$$\text{COP théorique chauffage} = Q_c / W_c \Rightarrow Q_c / (Q_c - Q_f) \Rightarrow T_c / (T_c - T_f) \quad (3)$$

$$\text{COP théorique froid} = Q_f / W_f \Rightarrow Q_c / (Q_c - Q_f) \Rightarrow T_f / (T_c - T_f) \quad (4)$$

$$\text{COP-chauffage} = \text{COP-froid} + 1 \quad (5)$$

$T_c (>) T_f$ sont les températures absolues (K) des sources correspondantes.

Le COP théorique, $T_c / (T_c - T_f)$, est aussi qualifié de *Facteur thermodynamique de Carnot* (FAC).

Toutefois, le COP réel est moindre que le COP théorique (FAC) et est le produit de l'incontournable facteur thermodynamique de Carnot avec le rendement technique η_{pac} de la PAC :

$$\text{COP réel} = \text{COP théorique} * \eta_{pac} \quad \text{ou} \quad \text{FAC} * \eta_{pac} \quad (6)$$

Le rendement technique η_{pac} , qui est de l'ordre de 40 à 60 %, dépend des caractéristiques constructives de la PAC, dont :

- la surface et le coefficient de transfert des échangeurs de chaleur, qui influencent les chutes de température (pincements) entre l'eau du circuit d'entrée (Évaporateur) et de sortie (Condenseur) avec ceux du fluide thermodynamique interne de la PAC, ce qui influence in fine directement le FAC,
- et le rendement du compresseur et de son moteur électrique d'entraînement.

Dès lors que sont intégrées les énergies du réseau externe à la PAC (pompes, échanges thermiques parasites dudit réseau, etc.), il ne s'agit plus exclusivement du COP de la PAC (COPAC) mais celle du système entier (COPsys).

Le COP est donc directement influencé par la température de ladite *source froide*, en l'occurrence pour GeniLac celle de l'eau du lac Léman prise à 45 m de profondeur (zone hypolimnion), avec une température relativement stable tout au long de l'année (5 à 8°C, avec une moyenne à 6,5°C). La température à la prise d'eau peut

néanmoins subir de brusques variations. Ce phénomène a été observé (Fig. 3.3) par les SIG sur le réseau GLN (captage à – 35 m) lors du retournement (brassage) inopiné du Petit-Lac Léman en mi-saison les jours de grand vent où la température à la prise d'eau bascule brusquement de minimum 5 à maximum 17 °C.

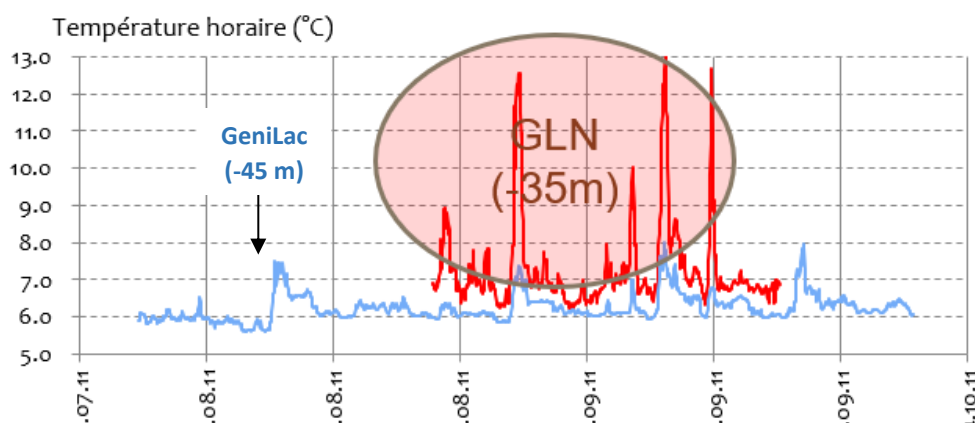


Figure 3.3 : Fluctuations de la température au niveau de la prise d'eau en fonction de la profondeur dans le Petit-Lac Léman (SIG)

Selon les données des SIG² du système Genilac (tableau 3.4 ci-dessous), le COP(ac) d'une PAC (avec les pompes de la Sous-Station du Bâtiment), accroît de 23 % quand l'eau du lac est à 15°C au lieu de 3°C. La consommation électrique des PAC diminue alors dans la même proportion (23 %) pour un accroissement de 12°C de la température à la prise d'eau lacustre ($\Delta \approx 2\%/^{\circ}\text{C}$). La PAC est de type Eau/Eau, TRANE RTSF 110 [63].

Température moyenne
de la source froide :
6,5 °C au captage (- 45 m)

Données de la PAC				Données introduites en ordre croissant selon la température de la source				
Nom et type de PAC								
Données de puissance de la PAC				Pompes: Consenseur inclus dans le COP Evaporateur inclus dans le COP				
Chauffage	T Dep °C	Température de la source de chaleur:	°C	3	5	8	12	15
		Puissance therm.	kW	352.65	375.4	410.3	459.6	498.96
T Dep 35 °C	35	COP	-	4.614	4.801	5.076	5.432	5.689
ECS eau chaude sanitaire								
T Dep 65 °C	65	Température de la source de chaleur:	°C	3	5	8	12	15
		Puissance therm.	kW	313	330.72	357.8	397.04	428.8
		COP	-	2.561	2.659	2.808	3.013	3.172

Tableau 3.4 : Performance (COP) des pompes à chaleur (PAC), avec les pompes de circulation dans la sous-station d'immeuble, en fonction de la température de la source froide lacustre et de l'usage (Chauffage, ECS)

Sur le tableau 3.4 ci-dessus, on observe clairement la différence du « COPac » en fonction de la température de la source froide (lac) et celle de l'usage (Chauffage / ECS). Toujours dû au *Facteur de Carnot* (FAC), le COPac est près du double pour le Chauffage (départ à 35°C => COP = 4.93), par rapport à l'ESC (départ à 65°C => COP = 2,73).

Le ratio Chauffage / ECS influence la performance du réseau GeniLac (COPac-mix, de 2,73 à 4,93). Ceci est illustré dans le Tableau 3.5 suivant et calculé sur la base des données du Tableau 3.4 précédant, pour des mix différents de Chauffage et d'ECS. Pour l'état actuel d'assainissement du parc immobilier, avec un mix typique entre la part de Chauffage et d'ECS de 70/30 %, on obtiendrait un COPac-mix moyen hivernal des PAC de 3,97 :

$$\text{COPac-mix moyen} = 1/((0,7/\text{COP-chauffage}) + (0,3/\text{COP-ECS})) = 3,97 \quad [-] \quad (7)$$

Le COPac des mix Chauffage/ECS (Tab 3.5, lignes 9 à 17) est calculé avec le Facteur de Carnot (FAC, lignes 21-22) et le Rendement technique respectif (Rt, lignes 26-27) extrait du COPac à 100 % Chauffage (ligne 6) et de 100 % ECS (ligne 7). Pour le COPsys (du système global avec le réseau GeniLac), le rendement technique doit également intégrer l'énergie absorbée par la pompe de circulation du réseau principal de GeniLac.

² <https://www.cuepe.ch/html/enseigne/pdf/semin-19-20-5.pdf> Enjeux et développement des réseaux thermiques basse température à Genève, Fabrice Malla, Services Industriels de Genève.

Température moyenne de la source froide
6,5 °C au captage (- 45 m)

	A	B	C	D	E	F	G	H
1		Temp. source froide (Tf)	(Moyenne hivernale)			GeniLac seul		
2		°C	3	5	6,5	8	12	15
3	COPAC mix	°K	276	278	279,5	281	285	288
4	Chauffage / ECS	Tc source	COPAC GeniLac seul (données sources SIG)					
5	Ch. % / ECS %	chaude (K)	(données)	(données)	(calcul)	(données)	(données)	(données)
6	100 % Chauffage	308	4,61	4,80	4,93	5,08	5,43	5,69
7	100 % ECS	338	2,56	2,66	2,73	2,81	3,01	3,17
8	Mix Ch / ECS	(calcul)	(calcul)	(calcul)	(calcul)	(calcul)	(calcul)	(calcul)
9	77 % / 23 %	315	3,90	4,05	4,16	4,28	4,59	4,81
10	70 % / 30 %	317	3,72	3,87	3,97	4,09	4,38	4,60
11	63 % / 37 %	319	3,56	3,70	3,80	3,91	4,19	4,40
12	60 % / 40 %	320	3,49	3,63	3,73	3,84	4,11	4,32
13	55 % / 45 %	322	3,39	3,52	3,62	3,72	3,99	4,19
14	50 % / 50 %	323	3,29	3,42	3,52	3,62	3,88	4,07
15	40 % / 60 %	326	3,12	3,24	3,32	3,42	3,67	3,85
16	30 % / 70 %	329	2,96	3,07	3,15	3,24	3,48	3,66
17	20 % / 80 %	332	2,81	2,92	3,00	3,08	3,31	3,48
18								
19	COPAC mix	Tc source	Calcul Facteur de Carnot (FAC) des PAC GeniLac = Tc / (Tc-Tf)					
20	Chauffage / ECS	chaude (°K)						
21	100 % Chauffage	308	9,63	10,27	10,81	11,41	13,39	15,40
22	100 % ECS	338	5,45	5,63	5,78	5,93	6,38	6,76
23								
24	COPAC mix	Tc source	Calcul Rendement technique (Rt) des PAC GeniLac = COP / FAC					
25	Chauffage / ECS	chaude (°K)						
26	100 % Chauffage	308	0,48	0,47	0,46	0,44	0,41	0,37
27	100 % ECS	338	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47

Tableau 3.5 : Performance (COPac) des pompes à chaleur (PAC), avec les pompes amont et aval, du système GeniLac (COPsys ?) en fonction de la température de la source froide lacustre et le mix Chauffage / ECS (calculs)

L'évolution Climatique et de l'efficacité énergétique du bâti (ECEEB-2050) va progressivement ramener le « mix Chauffage/ECS » (MixC/E) en 2050 plus proche de l'équilibre (55/45, ligne 12, Tableau 3.5) et renforcé à terme par l'alimentation des appareils électroménagers en ECS. Il aura aussi pour conséquence d'abaisser la performance hivernale future des Réseaux Thermo-Lacustre (RTL) tels que GeniLac. **Il y a donc là un énorme enjeu sur l'impact de la production de l'Eau Chaude Sanitaire (ECS) !**

3.2 Bilan énergétique global du système GeniLac seul (sans ULISSE ni CORSAIRE)

L'impact hydraulique et thermodynamique de l'évolution saisonnière de la température de la prise d'eau lacustre se retrouvent dans le bilan énergétique global ainsi que dans les dernières Prévisions énergétiques de GeniLac³. Selon les données des SIG, la fourniture de Froid en free-cooling (Qf) et celle de Chaleur (Qc) ainsi que les consommations énergétiques annuelles associées pour GeniLac sont les suivantes :

Froid semestre d'été par free-cooling (Qf ou Qe) :	245	[GWh-t]	(8)
Chauffage + ECS semestre d'hiver (Qc ou QH) : (≈1 PJ)	277	[GWh-t]	(9)
Électricité pompage Hydraulique lacustre annuel (EPHan) :	23	[GWh-é]	(10)
Électricité des PAC de chauffage hivernal (EPac) :	69	[GWh-é]	(11)
Gaz naturel d'appoint (secours ?) chauffage (Og) :	27	[GWh-t]	(12)

Les régimes nominaux de la température de l'eau d'extraction et de restitution au lac, pour l'Été (Climatisation) et l'Hiver (Chauffage), sont environ les suivants, avec un écart de température aller-retour correspondant (ΔT) :

Été (Climatisation) : 13/18 °C (nominaux) ; 7/12°C (moyennes extraction/restitution lac) ; $\Delta T_E = 5$ K (13)

Hiver (Chauffage) : 5/2 °C (nominaux) ; 6,5/3,5°C (moyennes extraction/restitution lac) ; $\Delta T_H = 3$ K (14)

³ 1) De GLN à GeniLac, 10 ans d'apprentissage dans la valorisation thermique des eaux du Léman, ARPEA 27/9/2019, Sophie Durandeu, SIG. 2) Le programme Genilac, Prévisions énergétiques, avril 2022, Gilles Ottaviani, SIG.

3.2.1 Remarques & Considérations liminaires

- Normalement les besoins/productions de chaleur ne sont pas strictement limités au semestre d'hiver (SH). Durant le semestre d'été (SE), il y a également une production d'Eau Chaude Sanitaire (ECS) avec les PAC alimentées en partie par l'eau du lac.
- Typiquement en saisons intermédiaires (automne/printemps), les besoins de froid et de chaud peuvent parfois s'équilibrer avec le réseau hydrothermique du secteur aéroport de GeniLac fonctionnant alors partiellement en boucle semi-fermée (boucle anergie, échanges limités avec le lac).
- Toutefois, pour le présent bilan comparatif, on considère que les fournitures de froid et de chaud sont cantonnées respectivement au semestre d'été et d'hiver, de façon continue chacune sur 4'380 h.
- Compte tenu des faibles écarts de températures entre le réseau et le terrain ($\Delta T_{r-t} < 10$ K), les échanges thermiques sont considérés comme négligeables (pour GeniLac seul) et ainsi qu'avec ULISSE par un minimum d'isolation ciblée du réseau.
- La capacité ou le Débit Lacustre Nominal de la Station de pompage du Vengeron est de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ (DLN).
- L'appoint de combustible (27 GWh-t gaz), représentant 10 % des besoins de chaleur (Q_c , Q_h) est considéré destiné à une fourniture de secours (backup). Il n'entre donc pas ici dans le bilan dudit réseau.

3.2.2 Quid de l'intégration de « l'appoint gaz »

L'apport complémentaire d'énergie-chaleur, à partir de gaz naturel (*Erdgas* ou gaz fossile) devrait avoir qu'un **usage de secours (backup) pour le réseau GeniLac** mais pas pour couvrir des pointes de demandes de chaleur.

Le Débit Nominal (DLN : $10 \text{ m}^3/\text{s}$) de la Station de pompage (STAP) du Vengeron et de circulation de l'eau dans le réseau GeniLac (sans l'aide d'ULISSE) peut théoriquement extraire du lac près de 550 GWh-t d'énergie-chaleur (QLN^-) sur la durée du Semestre d'Hiver ou du chauffage urbain (t_{mH} : 4'380 h). C'est le triple de la capacité d'extraction moyenne lacustre (QL^- : 177 GWh-t, éq.36), avec une puissance nominale (PLN^-) de 125 MW-t (éq.37.bis) et qui est le double de la puissance moyenne journalière et Utile fournie par les PAC (PU^+) de 57 MW-t (éq.44).

$$\begin{aligned} QLN^- &= DLN * c * \Delta T_H * t_{mH} = & 548,7 & \quad [GWh-t] & (15) \\ PLN^- &= DLN * c * \Delta T_H = QLN^- / t_{mH} = & 125,3 & \quad [MW-t] & (37.bis) \end{aligned}$$

Toutefois, par rapport au besoin moyen hivernal d'énergie et de puissance-chaleur Utile (QU^+ : 250 GWh-t & PU^+ : 57 MW-t), le besoin thermique varie journalièrement en fonction de la température atmosphérique (impactant le Chauffage Ambiant) et celle du Réseau d'Eau Potable (impactant le besoin énergétique pour l'ECS).

Ses deux paramètres de température suivent logiquement (*en opposition de phase*) l'apport solaire naturel, qui varie de façon *sinusoïdale* et saisonnière, avec une *amplitude* (valeur nominale) et une *périodicité* annuelle. La valeur moyenne ou « efficace » égale $1/\sqrt{2}$ de l'amplitude ou valeur nominale de ladite variation sinusoïdale. Sur la période du semestre d'Hivernal, la demande nominale ou de pointe de puissance-chaleur Utile (PUp^+) est donc $\sqrt{2}$ ou 1,414 fois la demande « efficace » ou moyenne (PUm^+) :

$$PUp^+ = \sqrt{2} * PUm^+ = 1,414 * 57 \text{ MW-t} = 81 \quad [MW-t] \quad (16)$$

Les 27 GWh-t d'appoint gaz peuvent, soit être injectés au départ dudit réseau, soit être fournie parallèlement via le réseau de gaz existant dans les sous-stations des immeubles où sont aussi installés les PAC chauffage et ECS. Dans les deux cas, il faut convertir l'énergie primaire du gaz en énergie-thermique Utile (QU^+) via une chaudière à combustion ou via un groupe de Couplage Chaleur-Force (CCF, cogénération de chaleur et d'électricité).

Une grande centrale énergétique (chaudière ou CCF), pour l'injection au départ du réseau GeniLac profiterait d'une économie d'échelle (sur le plan d'investissement et d'exploitation/entretien) ; ceci par rapport à une multitude de petites chaudières réparties dans les sous-stations des immeubles raccordés à GeniLac. Sauf qu'une centrale unique reste sujette à une défaillance au détriment de l'ensemble du réseau GeniLac ou inversement. Du reste, ce dernier (SIG) à une **obligation contractuelle de fourniture vis-à-vis des clients captifs** (nécessitant de la redondance et du backup).

Une centrale CCF n'est économiquement rentable qu'au-delà de 3'000 heures de fonctionnement, c.-à-d. en régime optimal constant. Néanmoins sa rapidité de démarrage permet aussi de servir de groupe de secours.

À titre d'exemple, la combustion/conversion des 27 GWh-t d'énergie-chaleur par un groupe CCF (centralisée ou non), permettrait de produire 40 % d'électricité (10.8 GWh-é), 50 % de chaleur utile (13,5 GWh-t) et 10 % de pertes. L'injection directe dans le réseau d'eau en amont de l'évaporateur des PAC, des 27 GWh-t ou 6,16 MW-t de l'appoint gaz, générerait un gain de 0,45°C (ΔT_{gaz}) ce qui porterait la source froide à 7°C ou 280 K :

$$\Delta T_{\text{gaz}} = P_{\text{gaz}} / (D L_{mH} * c) = 6,16 \text{ MW-t} / (3,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} * 4,18 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}) = 0,45 \text{ [K]} \quad (17)$$

Sur le Tableau 3.5 (colonne F), le COP-mix 70/30 (ligne 10) passe alors de 4,27 (E-10) à 4,34 (F-10) et l'énergie électrique totale absorbée par les PAC ($E_{\text{pac+}}$) est alors de près de 64 GWh :

$$E_{\text{pac+}} = Q_{U+} / \text{COPAC-mix 70/30} = (250 + 27) \text{ GWh} / 4,34 = 63,8 \text{ [GWh-é]} \quad (18)$$

Ce serait alors 4,8 GWh-é d'électricité supplémentaire absorbée par les PAC, par rapport au 59 GWh-é (11.bis) de GeniLac seul (sans appoint gaz ni ULISSE). Le COP-gaz spécifique serait alors ici de 5,6.

$$\text{COP-gaz} = 27 \text{ GWh-t} / (63,8 - 59 \text{ GWh-é}) = 5,6 \quad [-] \quad (19)$$

Conclusion : les 59 GWh-é d'alimentation de base des PAC sont à priori d'origine renouvelable (sans GES). Ce serait donc contre-productif (GES) de les substituer partiellement avec le 27 GWh-gaz par une production électrique via CCF (source de GES).

3.2.3 Flux énergétiques et hydrauliques initiaux pour GeniLac, en l'État Climatique et d'Efficiences Énergétique du Bâti – Actuel (ECEEB-A)

Avec un COPsys estival en free-cooling (sans PAC) annoncé à 18 (COPsysE), la part estivale de l'énergie de pompage hydraulique (EP_{HE}), pour la fourniture de froid (Q_f) de 245 GWh-t, est le ratio $Q_f / \text{COP}_{\text{E}}$:

$$EP_{HE} = Q_f / \text{COP}_{\text{sysE}} = 245 / 18 = 13,6 \text{ [GWh-é]} \quad (20)$$

En première approximation, on peut donc estimer l'**Energie électrique de pompage** hydraulique et de circulation de l'eau du lac dans le réseau GeniLac pour le chauffage Hivernal (EP_{HH}) :

$$EP_{HH} = E_{\text{pan}} - EP_{HE} = 23 \text{ GWh-é} - 13,6 \text{ GWh-é} = 9,4 \text{ [GWh-é]} \quad (21)$$

Déduction de l'appoint gaz (Q_g) de 27 GWh (exclusivement en hiver), la fourniture minimale de chaleur par le biais des PAC (Q_{pac}) est le suivant :

$$Q_{\text{pac}} = Q_H - Q_g = 277 \text{ GWh-t} - 27 \text{ GWh-t} = 250 \text{ [GWh-t]} \quad (22)$$

Pour fournir les 250 GWh-t d'énergie-chaleur (Q_{pac}), totale l'énergie électrique du système hivernale (E_{sysH}) est la somme de l'énergie électrique des PAC (E_{pac}) et l'Energie électrique de pompage hivernale (EP_{HH} , arrondie à 10 GWh-é) :

$$E_{\text{sysH}} = E_{\text{pac}} + EP_{HH} = 69 \text{ GWh-é} + 10 \text{ GWh-é} = 79 \text{ [GWh-é]} \quad (23)$$

Selon les relations de performance des PAC (éq.1 à 6), sans l'énergie de pompage hydraulique hivernal (EP_{HH}), le COP_{pac} est le quotient de l'énergie-chaleur (éq.22) fournie par les PAC (Q_{pac}) avec l'électricité absorbée (E_{pac}) :

$$\text{COP}_{\text{pac}} = Q_{\text{pac}} / E_{\text{pac}} = 250 \text{ GWh-t} / 69 \text{ GWh-é} = 3,62 \quad [-] \quad (24)$$

$$\text{Avec l'énergie de pompage, le } \text{COP}_{\text{sysE}} = Q_{\text{pac}} / (E_{\text{pac}} + EP_{HH}) = 3,2 \quad [-] \quad (25)$$

3.2.4 Remarques : COP_{pac} ou COP_{sys} ?

Selon le Tableau 3.5, un COP_{sys} avec pompes de 3,2 correspondrait à un ratio Chauffage / ECS proche de 30/70%, ce qui semble à priori étonnant (disproportion d'ECS ?).

Le COP dans le Tableau 3.5, n'intègre pas l'énergie des pompes de circulation du circuit principal de GeniLac (COP_{sys}). D'autre part, les dernières données prévisionnelles de GeniLac pour la consommation électrique des PAC (69 GWh-é) intègrent éventuellement (par erreur) la part hivernale d'énergie de pompage et de circulation d'eau du lac ($EP_{HH} \approx 10 \text{ GWh-é}$).

Dans ce cas, il faut considérer que la consommation électrique des PAC est plus proche de 63 GWh-é (11.bis), avec un COPac = 3,97 pour un MixC/E : 70/30. Toutefois, ceci impacte exclusivement le fonctionnement hivernal.

Avec cette hypothèse, le calcul (11.bis) pour l'énergie électrique totale hivernale (Esys_H) et le COPac deviennent :

$$Esys_H = Epac + EPH_H = 63 \text{ GWh-é} + 10 \text{ GWh-é} = 73 \quad [\text{GWh-é}] \quad (26)$$

$$COPac = Qpac / Epac = 250 \text{ GWh-t} / 63 \text{ GWh-é} = 3,97 \quad [-] \quad (27)$$

Un COPac de 3,97 correspond au COPsys mix 70/30 de 3,43 calculé au Tableau 3.5, déduit du Tableau 3.4 et qui est proche de l'état actuel du parc immobilier genevois (Mix chauffage/ECS 70/30).

$$\text{De même, avec l'énergie de pompage le COPsys} = Qpac / (Epac + EPH_H) = 3,43 \quad [-] \quad (28)$$

Selon le Tableau 3.5, ceci correspond à un mix Chauffage/ECS proche de 45/55, également plus réaliste, en tout cas en considérant l'évolution potentielle de l'assainissement énergétique des bâtiments avec une part croissante voire à terme dominante de l'ECS (ECEEB).

L'électricité hivernale pour le chauffage de 73 GWh-é (Esys_H, éq.26) est à mettre en perspective avec 14 GWh-é d'électricité estivale des pompes hydrauliques du free cooling (EPH_E, éq.20). En outre, l'Esys_H est quasi identique à l'économie électrique grâce au free-cooling de 70 GWh-é, sauf qu'ils ne sont pas au même tarif (hiver/été) !

3.2.5 Volume, Débit et Puissance hydrauliques initiaux Estival (free cooling) en ECEEB-A

L'évacuation de 245 GWh-t de chaleur du rafraîchissement estival (Q_E) des bâtiments, additionnée de l'énergie électrique de pompage hydraulique (EPH_E : 14 GWh-é, dissipée physiquement en 14 GWh-t chaleur), représente **259 GWh-t d'énergie-chaleur à injecter dans le lac (QL⁺)** :

$$QL^+ = Q_E + Ep_E = 245 \text{ GWh-t} + 14 \text{ GWh-t} = 259 \quad [\text{GWh-t}] \quad (29) \quad \Rightarrow \text{TAB. 5.12 : D-28}$$

Avec un ΔT_E = 5 K (13), cela représente un volume estival d'eau lacustre pompé (V_E) de près de 45 M m³ :

$$V_E = QL^+ / (c * \Delta T_E) = 259 \text{ GWh-t} / (1,16 \text{ kWh m}^{-3} \text{ K}^{-1} * 5 \text{ K}) = 45 \cdot 10^6 \quad [\text{m}^3] \quad (30) \quad \Rightarrow \text{TAB. 5.12 : D-26}$$

c : chaleur volumique de l'eau 1,16 kWh m⁻³ K⁻¹

Avec le Débit Lacustre Nominal de 10 m³/s (DLN) et un ΔT_E de 5 K (éq.13), entre la conduite d'adduction et celle du retour au lac, la Puissance thermique Nominale introduite dans le lac (PLN⁺) est la suivante :

$$PLN^+ = DLN * c * \Delta T_E = 10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} * 4,18 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1} * 5 \text{ K} = 209 \quad [\text{MW-t}] \quad (31) \quad \Rightarrow \text{TAB. 5.12 : D-29}$$

c : chaleur volumique de l'eau 4,18 MJ m⁻³ K⁻¹

Cela correspond à un temps « nominal » (t_{NE}) de 1'236 heures équivalent pleine puissance estivale :

$$t_{NE} = V_E / DLN = 44,7 \cdot 10^6 \text{ m}^3 / 10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} = 1'240 \quad [\text{h}] \quad (32) \quad \Rightarrow \text{TAB. 5.12 : D-7}$$

Toutefois, en supposant que la période de Climatisation par free-cooling s'étant en continue sur tout le semestre d'Été, soit sur 4'380 heures (t_{mE}), la puissance thermique moyenne introduite dans le lac (PLM⁺) est le quotient de l'Energie -chaleur introduite (QL⁺) avec le temps moyen du fonctionnement estival (t_{mE}) :

$$PLM^+ = QL^+ / t_{mE} = 259 \text{ GWh-t} / 4'380 \text{ h} = 59 \quad [\text{MW-t}] \quad (33) \quad \Rightarrow \text{TAB. 5.12 : D-31}$$

$$\text{la puissance moyenne du pompage (PPME)} = EPH_E / t_{mE} = 3 \quad [\text{MW-é}] \quad (34) \quad \Rightarrow \text{TAB. 5.12 : D-34}$$

$$\text{et le débit moyen estival (DLM}_E) = V_E / t_{mE} = 2,83 \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (35) \quad \Rightarrow \text{TAB. 5.12 : D-25}$$

3.2.6 Volume, Débit et Puissance hydraulique Hivernal (Chauffage + ECS), ECEEB-A

Pour le chauffage ambiant et l'ECS, l'énergie-chaleur extraite du lac (QL^-) de 177 GWh-t (éq.36) correspond aux 250 GWh-t (éq.22) de chaleur fournie par les PAC (Q_{pac} , QU^+ , éq.1) au niveau des condenseurs des PAC, déduction des 73 GWh-é (éq.26) d'énergie-électrique (Es_{ysH}), qui est la somme de 10 GWh-é (éq.21) des pompes hydrauliques (EPH_H) et des 63 GWh-é (11.bis) des PAC, toutes dissipées physiquement en chaleur (PLM^+) :

$$QL^- = Q_{pac} - Es_{ysH} = 250 \text{ GWh-t} - 73 \text{ GWh-t} = 177 \quad [\text{GWh-t}] \quad (36) \Rightarrow \text{TAB.5.12 : E-28}$$

Avec le ΔT_H limité à 3 K (14), on déduit le volume pompé hivernal (V_H) :

$$V_H = QL^- / (c * \Delta T_H) = 177 \text{ GWh-t} / (1,16 \text{ kWh m}^{-3} \text{ K}^{-1} * 3 \text{ K}) = 51 \cdot 10^6 \text{ [m}^3\text{]} \quad (29) \Rightarrow \text{TAB. 5.12 : E-26}$$

Avec le débit d'eau lacustre nominal de 10 m³/s (DLN) et un ΔT_H de 3 K (14), entre la conduite d'adduction et celle du retour au lac, on déduit la puissance thermique nominale extrait du lac (PLN^-) :

$$PLN^- = DLN * c * \Delta T_H = 10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} * 4,18 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1} * 3 \text{ K} = 125 \text{ [MW-t]} \quad (37) \Rightarrow \text{TAB. 5.12 : E-29}$$

Cela correspond à un temps nominal (t_{mH}) de 1'445 heures équivalent pleine puissance hivernale :

$$t_{mH} = V_H / DLN = 51 \cdot 10^6 \text{ m}^3 / 10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} = 1'445 \quad [\text{h}] \quad (38) \Rightarrow \text{TAB. 5.12 : E-7}$$

Comme pour la Climatisation, la période de chauffage s'étant, en continue, sur tout le semestre d'Hiver, soit également sur 4'380 heures (t_{mH}). La puissance thermique extraite du lac en moyenne (PLM^-) est alors le quotient de l'Energie -chaleur extraite (QL_H) avec le temps moyen de fonctionnement hivernal (t_{mH}) :

$$PLM^- = QL_H / t_{mH} = 177 \text{ GWh-t} / 4'380 \text{ h} = 40 \quad [\text{MW-t}] \quad (39) \Rightarrow \text{TAB. 5.12 : E-31}$$

La puissance électrique absorbée par les compresseurs des PAC (P_{pac}^+) est le quotient de l'Energie électrique absorbée ($Epac^+$) avec le temps moyen de fonctionnement hivernal (t_{mH}) :

$$P_{pac}^+ = Epac^+ / t_{mH} = 63 \text{ GWh-é} / 4'380 \text{ h} = 14 \quad [\text{MW-é}] \quad (40) \Rightarrow \text{TAB. 5.12 : E-37}$$

La puissance électrique absorbée par le pompage hivernal (PPM_H^+) est le quotient de l'Energie électrique absorbée (EP_H^+) avec le temps moyen de fonctionnement hivernal (t_{mH}) :

$$PPM_H^+ = EP_H^+ / t_H = 10 \text{ GWh-é} / 4'380 \text{ h} = 2,28 \quad [\text{MW-é}] \quad (41) \Rightarrow \text{TAB. 5.12 : E-34}$$

$$\text{Le Débit lacustre moyen hivernal (DLM}_H\text{)} : V_H / t_{mH} = 3,23 \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (42) \Rightarrow \text{TAB. 5.12 : E-25}$$

Pour vérification, sur la base du débit moyen (DLM_H) de 3,3 m³/s (éq.42), on retrouve bien la puissance thermique de chauffage hivernale extraite du lac (PLM^-) (éq.39 = éq.32) :

$$PLM^- = DLM_H * c * \Delta T_H = 3,12 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} * 4,18 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1} * 3 \text{ K} = 41,3 \text{ [MW-t]} \quad (43) \Rightarrow \text{TAB. 5.12 : E-31}$$

Finalement, la puissance thermique Utile moyenne (PU^+ , P_m , éq.44) fournie par les PAC (hors appoint gaz en hiver) est le quotient de l'Energie-chaleur fournie (QU^+ , Q_{pac} éq.22) avec le temps moyen de fonctionnement hivernal (t_{mH}) :

$$P_m \text{ ou } PU^+ = QU^+ / t_{mH} = 250 \text{ GWh-t} / 4'380 \text{ h} = 57 \quad [\text{MW-t}] \quad (44) \Rightarrow \text{TAB. 5.12 : E-17}$$

Elle est également à la somme de la puissance moyenne thermique soutirée du lac (PLM^- , éq.43) avec les puissances électriques des pompes hydrauliques situés dans la STAP du Vengeron (PPH^+ , éq.41) et celle des PAC (P_{pac}^+ , éq.40) :

$$P_m \text{ ou } PU^+ = PLM^- + PPM^+ + P_{pac}^+ = 40 + 2,3 + 14 = 57 \quad [\text{MW-t}] \quad (44.\text{bis}) \Rightarrow \text{TAB. 5.12 : E-17}$$

La figure 3.6 ci-dessous reprend l'ensemble des flux ramenés au débit moyen de pompage d'eau du lac (DLM_H : 3,3m³/s) pour la fourniture par les PAC de l'énergie-chaleur Utile pour le Chauffage ambiant et l'ECS en semestre d'hiver (250 GWh-t, hors appoint gaz). Les PAC sont installées dans les sous-stations situées dans les immeubles avec les échangeurs de chaleur séparant le circuit des PAC du Réseau Thermo-Lacustre (GeniLac). L'ensemble des valeurs sont reprises dans le **Tableau 5.12**.

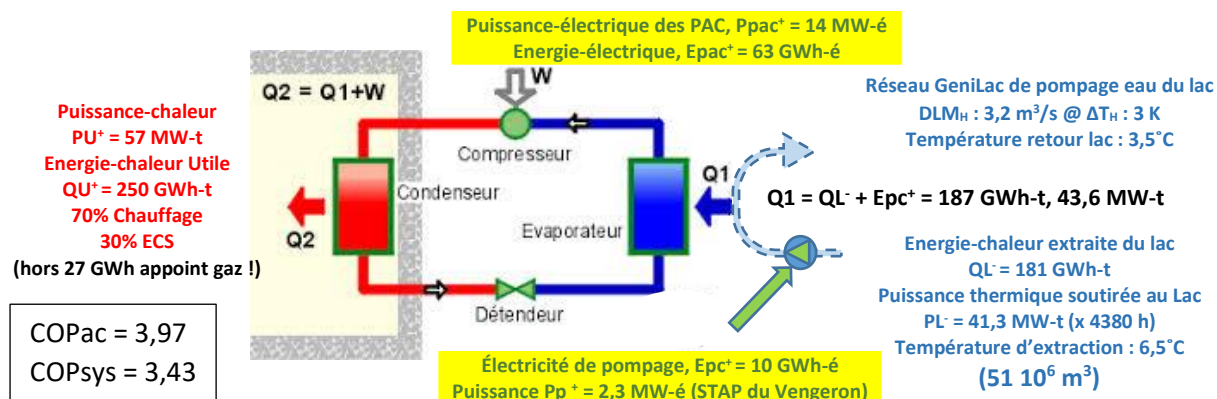


Figure 3.6 : Schéma des flux hivernaux d'eau et d'énergie pour les PAC de GeniLac (ECEEB-A, TAB. 5.12, D-E)

3.2.7 Conséquence de l'État Climatique et d'Efficiace Énergétique du Bâti en 2050

Sur une fourchette inférieure de l'étude *ClimaBau – BFE 2017*, [...], on a considéré que le réchauffement climatique d'ici 2050 augmentera de 20 % le besoin de rafraîchissement (Climatisation) et inversement réduira de 20 % le Chauffage Ambiant (CA). De plus, l'amélioration de l'efficacité énergétique du bâti réduira le CA encore de 20 %.

On propose ici (recommandation) et fait l'hypothèse pour 2050, **du raccordement généralisé des lave-linges et lave-vaisselles à l'Eau Chaude Sanitaire (ECS), fonctionnant avec des PAC**, ce qui en augmentera la demande de 20 % supplémentaires. Ceci au motif qu'il serait paradoxal de continuer à chauffer l'eau desdites machines électroménagères par « effet joule » (dégradation directe de l'électricité en chaleur)

L'évolution, concomitante de la *climato efficace énergétique du Bâti* (CEE-2050) des immeubles d'habitations, réduira donc (à parts égales) de l'ordre de 40 % l'Indice de Demande de Chaleur spécifique au Chauffage (IDC-C), exprimé en MJ/m² SRE (Surface de Référence Énergétique).

Avec une réduction de 40 % de l'IDC-C, le « MixC/E » passe de 70/30 % (en l'état actuel) à 55/45 % en 2050. Il aura pour conséquence que la densité énergétique spatiale (J/m²) des réseaux RTL (tels que GeniLac) va diminuer de seulement 22 %, due à l'augmentation concomitante de la demande d'ECS de 20%.

Pour maintenir la fourniture globale d'énergie-chaleur utile (Q_{U^+} : 250 GWh-t pour GeniLac), les réseaux RTL devront s'étendre spatialement afin de couvrir un plus grand territoire urbain ou un nombre plus important de branchements d'immeubles et d'utilisateurs (≈ 30 %).

Sans l'Extension du réseau et compte tenu l'évolution de l'ECEEB-2050, le débit (DPH) et l'énergie de pompage hydraulique (EPH) vont d'abord diminuer respectivement de 23 et 40 % (DPH ou PLM : 3,23 => 2,46 m³/s, **TAB. 5.12 : E-25 => G-25**, EPH : 10 => 6 GWh-é, **TAB. 5.12 : E-35 => G-35**).

Avec l'Extension du réseau, les pertes de charges hydrauliques vont remonter dans la proportion de ladite extension et résulteront en une remontée de l'énergie électrique des pompes de circulation (EPH) au niveau actuel prévu à 10 GWh-é pour GeniLac seul (sans ULISSE) en 2050 (=> **TAB. 5.12 : I-35**).

L'énergie-chaleur (Q_1) au niveau de l'évaporateur devrait alors se situer à 181 GWh-t (**I-27**), avec un débit correspondant et relativement proche de celui du GeniLac actuel ou initial :

$$DLM = (Q_1 - EPH) / c^* \Delta T_H = (181 - 10 \text{ GWh-é}) / 1,16 \text{ kWh m}^{-3} \text{ K}^{-1} * 3 \text{ K} = 3,12 \text{ [m}^3/\text{s}] \quad (45) \Rightarrow \text{TAB. 5.12 : I-25}$$

Parallèlement et toujours par rapport à l'état climatique actuel, le COPac mix 70/30 = 3,97 (Tab.4.1, E-10 ou **TAB. 5.12 : E-18**), passera en 2050 à un COPac mix 55/45% = 3.62 (Tab.4.1, E-12 ou **TAB. 5.12 : G-18**). Sans l'Extension du réseau, l'énergie électrique des PAC chutera d'abord de 63 GWh-é (**TAB. 5.12 : E-36**) à 54 GWh-é (**TAB. 5.12 : G-36**), puis avec l'Extension remontera à près de 69 GWh-é (**TAB. 5.12 : I-36**).

Illustré et résumé à la figure 3.7 ci-dessous, par rapport à la situation actuelle (ECEEB-A), pour GeniLac en 2050, la consommation électrique totale (Esys), comprenant celle des pompes hydrauliques (EPH) et des PAC (EPac), passera de 73 à 79 GWh-é (Esys : **TAB. 5.12 : E-38 => I-38**), et le COPsys hivernal passe alors de 3,43 à 3,18 (**TAB. 5.12 : E-19 => I-19**).

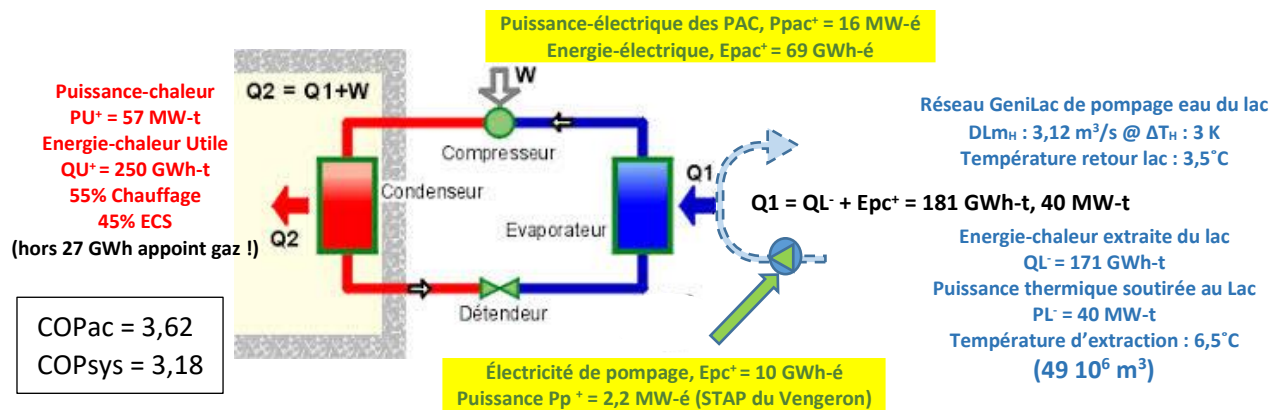


Figure 3.7 : Schéma des flux hivernaux d'eau et d'énergie pour les PAC de GeniLac avec 1^{ère} Extension du réseau (ECEEB-2050, **Tab.5.12, colonne I**)

Pour la prestation estivale par free cooling, en ECEEB-2050 avec une première Extension du réseau RTL, aura les conséquences suivantes :

- demande de froid (Qf) par l'RTL passe de 245 à 376 GWh-t (+53 %) => **TAB. 5.12 : D-10 => H-10**,
- volume lacustre pompé et restitué (VL) passe de 44 à 71 M m³ (+58 %) => **TAB. 5.12 : D-26 => H-26**,
- électricité pompes hydrauliques (EPH) passe de 14 à 33 GWh-é (+135 %) => **TAB. 5.12 : D-35 => H-35**,
- coefficient de performance du système énergétique (COPsys) passe de 18 à 11 (-39 %) => **TAB. 5.12 : D-19 => H-19**.

Le défi énergétique est moindre en semestre d'été par le besoin réduit de chaleur par PAC et suffisamment (voir trop) d'électricité PV. Par contre, due au déficit structurel d'énergie électrique en hiver, l'étude se focalisera davantage sur le fonctionnement du réseau RTL en semestre hivernal.

4 Intégration d'ULISSE au Réseau Thermo Lacustre GeniLac

Grâce à ULISSE, en disposant durant le semestre hivernal d'un captage d'eau lacustre à une température moyenne de 19°C au lieu de 6,5°C (GeniLac seul), soit un gain moyen de 12,5°C de la source froide (Tf), le bilan énergétique est amélioré, 1) au niveau des pompes à chaleur PAC et 2) au niveau des pompes hydrauliques.

4.1 Impact PAC à l'État Climato Efficience Énergétique du Bâti- Actuel (ECEEB-A)

En extrapolant (Tableau 4.1 ci-dessous) les données initiales de GeniLac (Tableau 3.4), avec une source froide (Tf) à 19°C (ULISSE) par rapport à 6,5°C (GeniLac seul), on observe sur les lignes 6 et 7 que le COPAC pour le chauffage à 35°C (308 K) passe de 4.93 à 8.42 (+ 70,68 %) et pour l'ECS à 65°C (338 K) de 2.73 à 3.47 (+ 26,87%).

En réalité, pour une question d'efficacité, la production d'eau chaude pour le Chauffage et l'ECS est réalisée par des PAC différents.

Température captage GeniLac seul 6,5°C (moyenne hivernale)								ULISSE 18 - 20°C					
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
1	COPAC mix	Temp. source froide (Tf)		(Moyenne hivernale)			GeniLac seul		Température Tf avec ULISSE			Gain COPAC	
2		°C	3	5	6,5	8	12	15	18	19	20	ULISSE /	
3		°K	276	278	279,5	281	285	288	291	292	293	GeniLac seul	
4	Chauffage / ECS	Tc source	COPAC GeniLac seul (données sources SIG)						Calcul COPAC avec ULISSE			(Tf 19°C/6,5°C)	
5	Ch. % / ECS %	chaude (K)	(données)	(données)	(calcul)	(données)	(données)	(données)	(COPAC = FAC * Rt)				(%)
6	100 % Chauffage	308	4,61	4,80	4,93	5,08	5,43	5,69	7,92	8,42	8,98		70,68
7	100 % ECS	338	2,56	2,66	2,73	2,81	3,01	3,17	3,39	3,47	3,54	26,87	
8	Mix Ch / ECS	(calcul)	(calcul)	(calcul)	(calcul)	(calcul)	(calcul)	(calcul)	(calcul)	(Moyenne)	(calcul)		
9	77 % / 23 %	315	3,90	4,05	4,16	4,28	4,59	4,81	6,06	6,33	6,64	52,26	
10	70 % / 30 %	317	3,72	3,87	3,97	4,09	4,38	4,60	5,66	5,89	6,15	48,33	
11	63 % / 37 %	319	3,56	3,70	3,80	3,91	4,19	4,40	5,30	5,51	5,73	44,92	
12	60 % / 40 %	320	3,49	3,63	3,73	3,84	4,11	4,32	5,16	5,36	5,56	43,59	
13	55 % / 45 %	322	3,39	3,52	3,62	3,72	3,99	4,19	4,95	5,12	5,31	41,53	
14	50 % / 50 %	323	3,29	3,42	3,52	3,62	3,88	4,07	4,75	4,91	5,08	39,64	
15	40 % / 60 %	326	3,12	3,24	3,32	3,42	3,67	3,85	4,40	4,53	4,67	36,30	
16	30 % / 70 %	329	2,96	3,07	3,15	3,24	3,48	3,66	4,09	4,21	4,33	33,44	
17	20 % / 80 %	332	2,81	2,92	3,00	3,08	3,31	3,48	3,83	3,93	4,03	30,67	

Tableau 4.1 : Extrapolation de la performance des pompes à chaleur eau-eau (COPAC) de GeniLac avec ULISSE en fonction de la température de la source froide lacustre jusqu'à 20°C avec ULISSE

Partant du calcul pour le COPac de GeniLac seul de 3,97 (éq.27), on observe (Tableau 4.1, ligne 10) qu'il correspond à un Mix 70/30 Chauffage/ECS, en l'Etat Climatique et d'Efficience Énergétique du Bâti - Actuel (ECEEB-A). Avec ULISSE, fournissant une source froide en moyenne de 19°C, le COPAC passe à 5,69 soit avec un gain de 48,33 % par rapport à GeniLac seul.

Pour fournir la même quantité d'énergie-chaleur Utile (QU^+ , sans l'appoint gaz) de 250 GWh-t (éq.22) mais avec un COPAC-mix 70/30 de 5,69 l'énergie électrique absorbée par les Pac (E_{pac}^+) est alors :

$$E_{pac}^+ = QU^+ / COPAC\text{-mix} = 250 \text{ GWh-t} / 5,69 = 42 \quad [\text{GWh-é}] \quad (46) \Rightarrow \text{TAB. 5.12 : J-36}$$

L'énergie électrique des PAC (E_{pac}^+), avec ULISSE (42 GWh-é) par rapport à GeniLac seul (63 GWh-é, TAB. 5.12 : E-36) est donc réduite de 21 GWh-é, soit une réduction de 1/3 !

La puissance électrique absorbée par les compresseurs des PAC (P_{pac}^+) est le quotient de l'Energie électrique absorbée (E_{pac}^+) avec la durée moyenne de fonctionnement hivernal (t_H) :

$$P_{pac}^+ = E_{pac}^+ / t_H = 42 \text{ GWh-é} / 4'380 \text{ h} = 10 \quad [\text{MW-é}] \quad (47) \Rightarrow \text{TAB. 5.12 : J-37}$$

La réduction d'électricité des PAC augmente l'énergie-chaleur à fournir à l'évaporateur de la PAC (Q_1), qui est la différence entre l'énergie-chaleur Utile ($QU^+ = 250 \text{ GWh-t}$) et l'énergie électrique (E_{pac}^+) absorbée les PAC :

$$Q_1 = QU^+ - E_{pac}^+ = 250 \text{ GWh-t} - 42 \text{ GWh-é} = 208 \quad [\text{GWh}] \quad (48) \Rightarrow \text{TAB. 5.12 : J-27}$$

Elle est précisément fournie par l'eau des réservoirs ULISSE à une température supérieure à GeniLac seul.

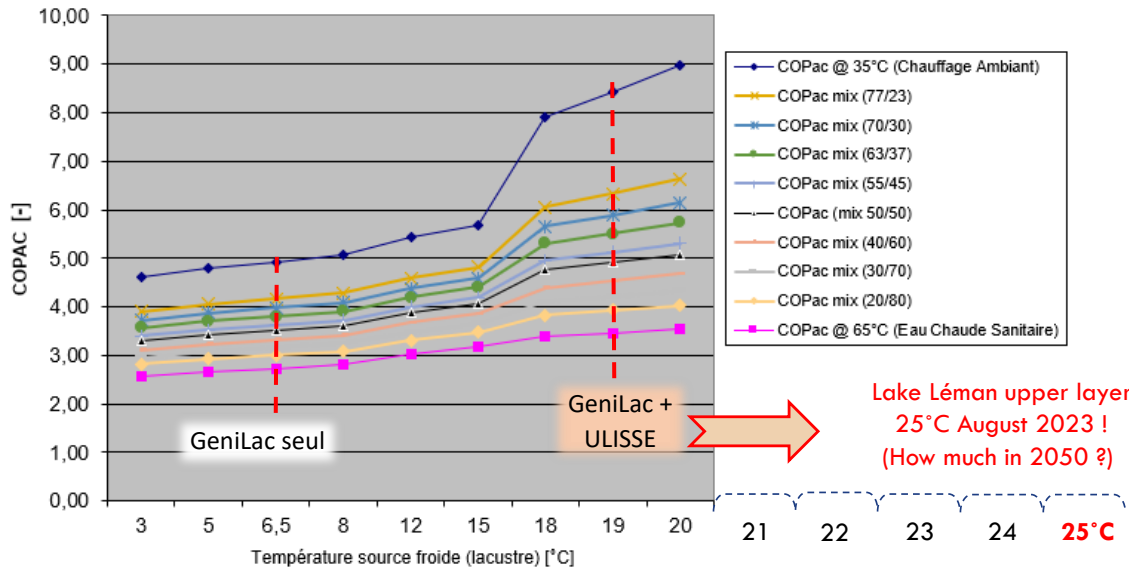


Fig. 4.2 : Performance des PAC (COPac) en fonction de la température de la source froide et du Mix Chauffage Ambiant/ECS.

4.2 Impact hydraulique à ECEEB-A

Avec une restitution d'eau au lac à une température inchangée de 3,5 °C, l'écart avec celle de l'extraction hivernale (ΔT_H) de 3 K (14) pour GeniLac seul (6,5°C– 3,5°C), passe à 15,5 K avec ULISSE (19°C – 3,5°C). Cela correspond à un Facteur ou un rapport inverse des ΔT_H respectifs $F_{\Delta T_H}$ de 5,2 :

$$Fr = \Delta T_{ULISSE} / \Delta T_{GeniLac} = 15,5K / 3K = 5,2 \quad [-] \quad (49)$$

En première approximation, pour une quantité égale d'énergie-chaleur extraite du lac (Q_L^-) ou d'énergie-chaleur égale à transmettre à l'évaporateur de la PAC (Q_1), le volume hivernal (V_H) et le débit (DLM_H) d'eau nécessaires sont réduits avec ce même Facteur (Fr) de 5,2 soit avec des réductions de 81 %.

Par ailleurs, les pertes de charges dans tout réseau hydraulique sont proportionnelles au carré du débit (DL). La puissance (P_{poc}) et l'énergie (E_{poc}) de pompage et de circulation de l'eau dans le réseau GeniLac sont donc aussi réduites proportionnellement au carré du même Facteur (Fr^2), égal à 27,4 soit une réduction de 96 % ($1-1/Fr^2$) :

$$Fr^2 = 5,2^2 = 27,04 \quad [-] \quad (50)$$

Toutefois, l'énergie-chaleur à l'évaporateur de la PAC (Q_1) avec ULISSE (214 GWh-t (Q_1 , éq.48) ainsi que celle à extraire du lac ne sont pas les mêmes qu'avec GeniLac seul (191 GWh-t = $Q_L^- + E_{pc}^+$). En effet, compte tenu de l'énergie électrique moindre absorbée par les PAC, une plus grande part d'énergie doit être extraite du lac.

La fourniture avec ULISSE au niveau de l'évaporateur des (214 GWh-t (Q_1 , TAB. 5.12, J-27), avec le ΔT_H de 15,5 K, on déduit le volume d'eau hivernal (V_H) plus précisément nécessaire :

$$V_H = Q_L^- / (c * \Delta T_H) = 208 \text{ GWh-t} / (1,16 \text{ kWh m}^{-3} \text{ K}^{-1} * 15,5 \text{ K}) = 11,5 \cdot 10^6 \text{ [m}^3] \quad (51) \Rightarrow \text{TAB. 5.12, J-26}$$

Le volume d'eau de GeniLac avec ULISSE, versus GeniLac seul, est réduit de 77 %.

Avec la durée moyenne de fonctionnement hivernal (t_{mH}), on déduit le Débit lacustre moyen hivernal (DLM_H) :

$$DLM_H = V_H / t_{mH} = 11,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3 / 4'380 \text{ h} = 0,73 \text{ [m}^3/\text{s}] \quad (52) \Rightarrow \text{TAB. 5.12, J-25}$$

À partir du Volume (V_H) ou du débit (DLM_H) et du temps moyen (t_{mH}) et du ΔT_H de 15,5 K, on peut déterminer l'énergie-chaleur extraite du lac via les réservoirs d'ULISSE (Q_L^-) :

$$Q_L^- = V_H * c * \Delta T_H = 11,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3 * 1,16 \text{ kWh m}^{-3} \text{ K}^{-1} * 15,5 \text{ K} = 207 \text{ [GWh-t]} \quad (53) \Rightarrow \text{TAB. 5.12, J-28}$$

Le Facteur de réduction (Fr) du Volume (V_H) et du Débit d'eau (DLM_H) avec ULISSE sont de 4,4 au lieu de 5,2.

La puissance et l'énergie de pompage de l'eau sont réduites de 95 % par le Facteur $Fr^2 = 19,4 (4,4)^2$, au lieu de 26,7, ce qui donne respectivement à PPH : 0,12 MW-é et EPH : 0,52 GWh-é (54) => **TAB. 5.12, J-34 et J-35.**

En l'État Climato Efficience Énergétique du Bâti – Actuel (ECEEB-A), l'énergie et la puissance électrique de GeniLac avec ULISSE, vs GeniLac initial, sont réduites de 48 %.

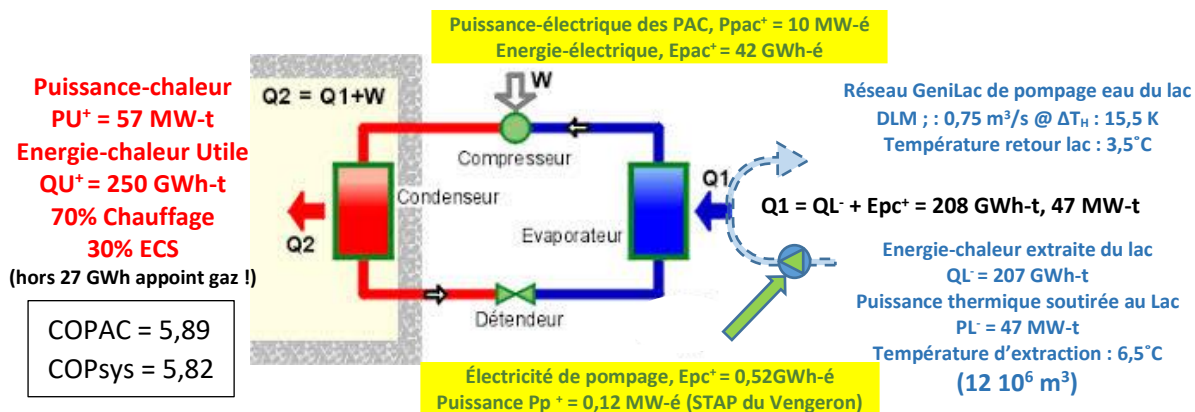


Figure 4.3 : Flux hivernaux d'eau et d'énergie pour les PAC de GeniLac initial + ULISSE (ECEEB-A, **Tab.5.12, colonne. J**)

4.3 Conséquence de l'Extension du réseau GeniLac avec ULISSE à ECEEB-2050

Indépendamment d'ULISSE « seul » (sans CORSAIRE), l'État Climato Efficience Énergétique du Bâti (ECEEB-2050) va également réduire de 40 % la densité énergétique spatiale (J/m²) des réseaux RTL (tels que GeniLac) et contraindre leur extension proportionnée afin de couvrir un plus grand territoire urbain à prestation égale.

Par contre, contrairement à GeniLac seul, avec ULISSE le débit (DLM_H : 0,73 m³/s, éq.52) et l'énergie hydraulique de circulation dans le réseau (EPH : 0,52 GWh-é, éq.54) étant initialement réduit de 95 %, une augmentation consécutive de l'extension d'environ 30 % du réseau reste négligeable (1,28 x 0,52 = 0,7 GWh-é).

Parallèlement, toujours par rapport à la situation initiale ou actuelle (ECEEB-A), le COPac mix 70/30 = 5.89 (Tab.4.1, J-10), sera susceptible de passer en 2050 à un COPac mix 55/45 = 5,12 (Tab.4.1, J-12). L'énergie électrique des PAC (E_{pac}) passe alors aussi de 42 à près de 49 GWh-é (**TAB. 5.12, J-36 => L-36**). L'énergie-chaaleur (Q₁) au niveau de l'évaporateur devrait baisser à 201 GWh-t (**TAB. 5.12, J-27 => L-27**) avec un débit correspondant (DLM) :

$$DLM = (Q1 - E_{pc}^*) / c^* \Delta T_H = (201 - 0,7 \text{ GWh-t}) / 1,16 \text{ kWh m}^{-3} \text{ K}^{-1} \cdot 15,5 \text{ K} \approx 0,71 [\text{m}^3/\text{s}] \quad (55) \Rightarrow \text{TAB. 22, L-24}$$

Résumé à la figure 4.4 ci-dessous, en ECEEB-2050, avec la première Extension du réseau GeniLac, l'énergie électrique des PAC sera de 49 GWh-é, avec un COPac de 5.12 et, à peine inférieure, un COPsys de 5.07.

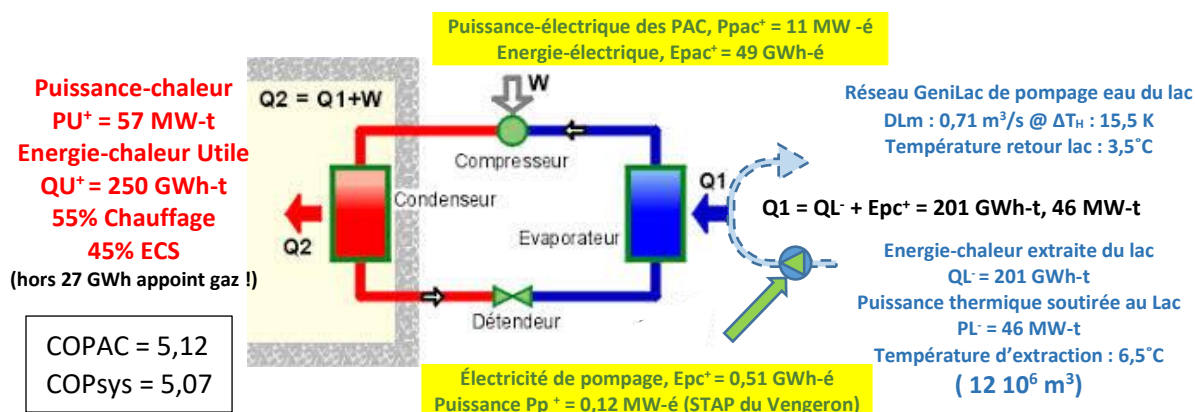


Fig. 4.4 : Flux hivernaux d'eau et d'énergie pour les PAC en 1^{re} Extension GeniLac + ULISSE (ECEEB-2050, **Tab.5.12, colon. L**)

5 Association du *free heating* CORSAIRE avec ULISSE au RTL GeniLac

5.1 Principe de fonctionnement

A l'instar de la climatisation estivale en « *free cooling* », le « *free heating* » hivernal CORSAIRE n'utilise pas de PAC. Le dégivrage hivernal du Réseau d'Eau Potable (REP) est principalement réalisé via un Échangeur de Chaleur à Plaques (ECP) en acier inoxydable ou en titane (fig. 5.1). L'eau potable est déglacée par échange à contre-courant avec le flux de chaleur issue du circuit d'eau primaire (source thermique) [43-47].

Cette source primaire de chaleur est en l'occurrence ici les Réservoirs ULISSE. Elle peut également être constituée d'autres sources telle que l'eau en sortie d'une station d'épuration d'eaux usées (STEP d'Aïre), contenant encore un potentiel thermique avant rejet final) ou toute autre source de rejets thermiques à basse température [4].

L'échangeur est situé en sortie de la Station de Pompage et de Distribution de l'Eau (SPDE « l'Arquebuse ») dans le REP genevois, de manière que l'eau potable soit toujours en surpression à celle de l'eau primaire afin d'éviter une contamination en cas de fuite dans l'échangeur. La pression du Château d'Eau Potable (CEP) a le même effet de protection hydrostatique lorsque la SPDE est à l'arrêt.

Une variante du procédé CORSAIRE est d'alimenter directement, avec l'eau des réservoirs ULISSE, la Station de Potabilisation de l'Eau (SPE « Priuré »). Ce *direct – free heating* (DFH) permet de s'affranchir de l'échangeur de chaleur (ECP). C'est une option logique, compte tenu que nombre de « cités lacustres » y puissent déjà leur eau potable. 200 M m³/an (20 %) de l'eau potable en Suisse sont d'origine lacustre par 30 stations de potabilisation (SSIGE).

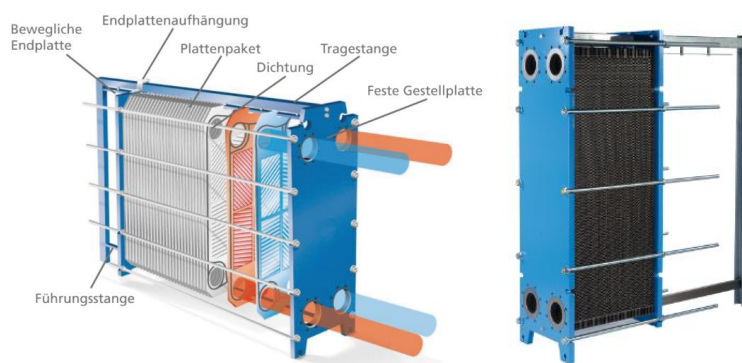


Figure 5.1 : Échangeur de chaleur à plaques (ECP) pour le procédé CORSAIRE en Indirect Free Heating (IFH)
(source : WT Heat Exchange Technologies AG)

5.2 Perte thermique du REP et qualité sanitaire de l'eau déglacée en hiver

Le REP n'étant pas isolé thermiquement, autre que par le sous-sol d'hébergement, celui-ci subit la variation saisonnière sinusoïdale et de la température du sol à la profondeur de son enfouissement. Cette dernière est induite par la conductivité thermique du sol, la température atmosphérique et la propagation du flux solaire. L'amplitude de la variation de l'onde thermique diminue avec la profondeur d'enfouissement. Pour rester au-dessus du gel de l'eau, le REP est généralement situé à une profondeur de l'ordre du mètre sur le Plateau Suisse.

L'amplitude de la variation saisonnière de la température de l'eau potable y est d'environ 10 K, culminant à 16°C en été et tombant à 6°C en hiver [54]. Il en résulte une variation, à la fois du volume d'ECS (du simple au double) et de l'énergie par m³ ; ceci au détriment du semestre d'hiver comme pour le Chauffage ambiant (voir Fig. 1.3 d'introduction § 1.3). Si cela impacte l'énergie thermique dans l'usage de l'eau potable, il influence aussi l'évolution de sa qualité sanitaire.

Si généralement l'activité bactériologique tend à croître avec la température, dans certaines limites, la cinétique et l'efficacité des processus (physico-chimiques, chimiques et biologiques) de potabilisation de l'eau sont aussi influencées positivement avec la température de l'eau tempérée plutôt que glacée en hiver ; ceci notamment avec l'usage de désinfectants oxydants (chlore, ClO₂) en fin de traitement dans la STAPE [42, 49, 50].

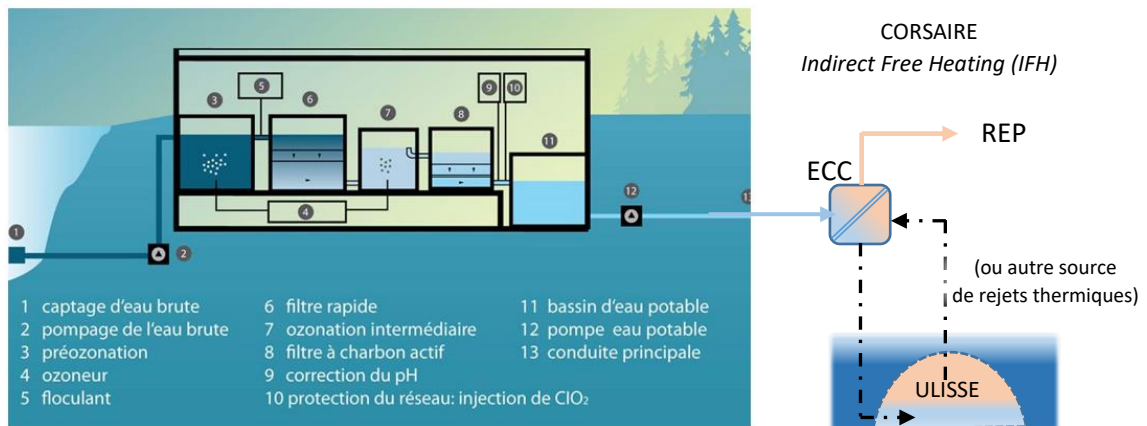


Figure 5.2 : Station de Potabilisation de l'Eau (STAPE) lacustre (source : SSIGE) couplée à ULISSE & CORSAIRE (IFH)

En outre, le passage rapide de l'eau potable dans l'échangeur de chaleur CORSAIRE (ECP, plusieurs m^3/s) produit un choc thermique brutale ($\Delta T/s$). Il est susceptible de générer un effet bactéricide, d'abord par un abattement brutal puis par un retard de croissance du nombre d'Unités Formant des Colonies de bactéries (UFC) [43].

La norme (ISO 8199) de potabilité de l'eau est < 300 UFC/ml (boîte de Petri) [5]. Par ailleurs, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) recommande une température cible de 8 à $15^\circ C$, avec un maximum autorisé de $25^\circ C$ à la fourniture d'eau potable en réseau.

Une dégradation microbiologique de l'eau potable en réseau peut être favorisée en été par l'échauffement progressif, sous le bitume de la chaussée chauffée par le soleil et/ou par un débit insuffisant, voire de stagnation prolongée en extrémité du réseau. Pour cela des stratégies prophylactiques ou curative sont normalement mises en place (purge ciblée ou continue, fontaines, re-chloration choc en fin de réseau à risque, etc.) [4, 42, 49, 50].

À contrario, en hiver l'eau potable déglacée par le procédé CORSAIRE et qui tarderait à être distribuée (hors densité du centre-ville), verrait sa température naturellement retomber en situation de « réfrigérateur » (propice à la conservation des denrées alimentaires, telle qu'est l'eau potable). La problématique typiquement estivale de la dégradation thermique de l'eau potable en réseau n'est donc à priori pas sans autre transposable à l'impact hivernal du procédé CORSAIRE. La correction hivernale de la température ne dépasse pas celle de l'été.

Le procédé CORSAIRE s'appliquerait donc en dessous de la limite de l'OMS, à des agglomérations urbaines de densité suffisante où la distribution de l'eau potable est rapide (quelques heures) depuis sa « production » (STAPE) et évidemment où sa température hivernale d'origine est faible (condition climatique minimale).

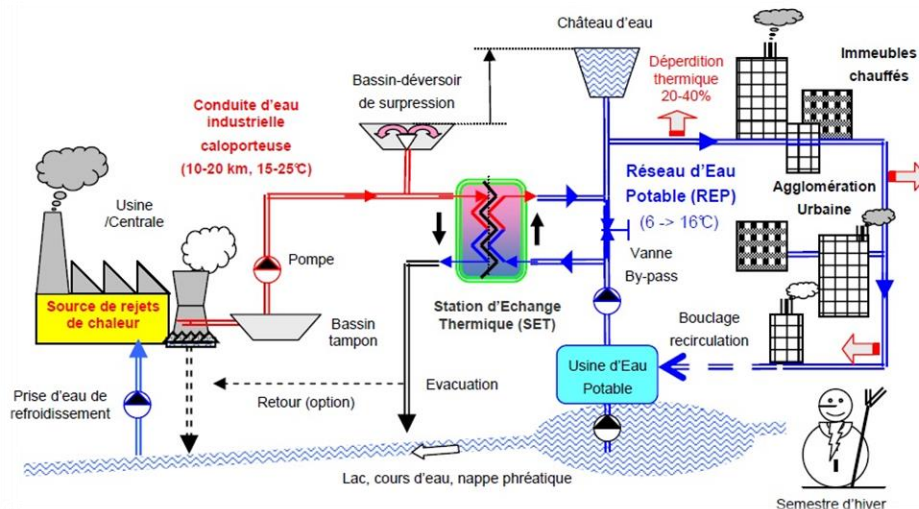


Figure 5.3 : Principe général du procédé CORSAIRE avec une source de rejets de chaleur industrielle

5.3 Usage de l'eau potable et interaction énergétique avec le bâti

Les distributeurs d'eau suisses fournissent chaque année 1 milliard de mètres cubes d'eau potable, avec environ 12% de pertes en réseaux (SSIGE). Une personne a besoin physiologiquement d'environ 2 litres d'eau par jour (en boisson ou alimentaire), alors qu'elle en consomme 140 litres tous usages confondus en Suisse. Combien de verres d'eau fraîche sont bues instantanément du robinet ?

En semestre d'hiver, l'essentiel de l'eau potable est à usage « indoor » à l'intérieur et subit des processus thermiques dans les bâtiments chauffés. Ceci, par l'ECS mélangée à l'eau potable froide (EPF), celle chauffée (électriquement !) dans les lave-linges, -vaisselles, machine à café, cuisine, nettoyage et celle involontairement dans tout le réseau non isolé d'EPF ainsi que dans les réservoirs des toilettes (impactant le chauffage ambiant).

La stagnation de l'eau froide, dans les réservoirs et les cuvettes des toilettes, constitue une source « parasite » et inattendue (négligée) de perte thermique en semestre de chauffage des immeubles. Chaque action d'une chasse d'eau des WC peut emporter jusqu'à 0,7 MJ (0,2 kWh) d'énergie-chaleur (13 litres d'eau @ 13K ΔT).

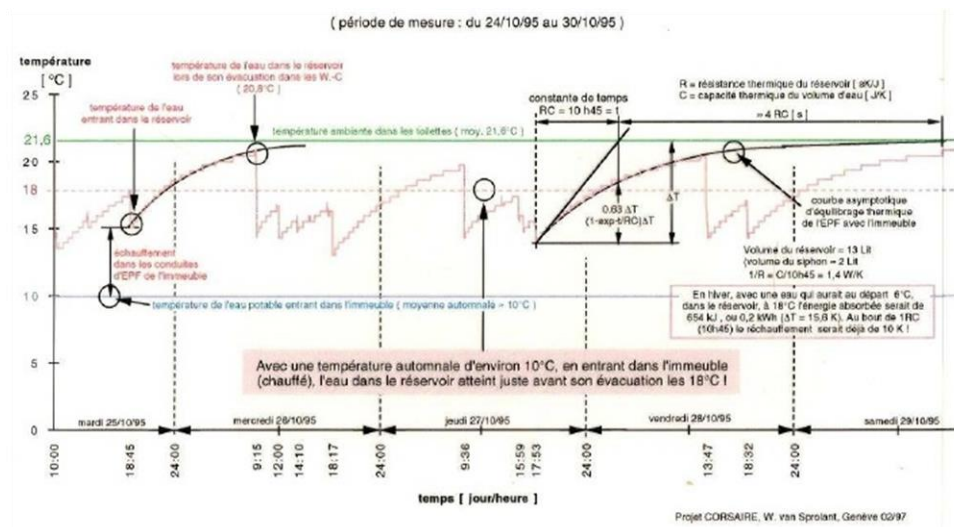


Fig. 5.4 : Évolution asymptotique de la température de l'eau froide des toilettes à Genève (accroissement moyen de 8°C déjà au début du semestre de chauffage). **Les WC = 1/3 de la consommation d'eau potable des ménages !**

L'impact final des WC va néanmoins dépendre du temps de résidence de l'eau dans le réservoir et la cuvette des toilettes, de son isolement thermique et de la ventilation des lieux (temporisé, récupération double flux, etc.).

5.3.1 Évolution saisonnière de la demande d'Eau Chaude Sanitaire (ECS)

L'Indice de Dépense de Chaleur (IDC) représente le besoin annuel de chaleur pour le Chauffage ambiant (Q_c) et la production d'Eau Chaude Sanitaire (Q_e ou Q_{ww}) rapporté à la surface de plancher chauffé du bâtiment ou Surface de Référence Énergétique (SRE) et est exprimé en MJ/m².an. Celui-ci dépend de la catégorie d'ouvrage.

Catégorie d'ouvrage	Besoin de chaleur pour l'eau chaude sanitaire Q_{ww}
Habitat collectif	75
Habitat individuel	50
Administration	25
Écoles	25
Commerces	25
Restauration	200
Lieux de rassemblement	50
Hôpitaux	100
Industrie	25
Dépôts	5
Installations sportives	300
Piscines couvertes	300

Tableau 5.5 : Q_{ww} (warm wasser), besoin de chaleur (MJ/m² SRE) pour l'eau chaude sanitaire (annexe A norme SIA 380/1)

À titre d'exemple, issu de la thèse UNIG Zraggen 2010 [64], avec le bâtiment central Giacometti du complexe de logements du Pommier à Genève, pour un immeuble au standard Minergie la part d'énergie pour l'ECS atteint 45% de l'IDC et peut atteindre près de 50%, voire davantage pour des standards supérieurs (THPE, § 3, Fig. 3.6). Le bilan thermique de l'exemple du bâtiment Giacometti du 1^{er} juin 2006 au 31 mai 2007 est caractérisé par un hiver 2006/2007 particulièrement doux et préfigure l'évolution climatique (CEEB-2050).

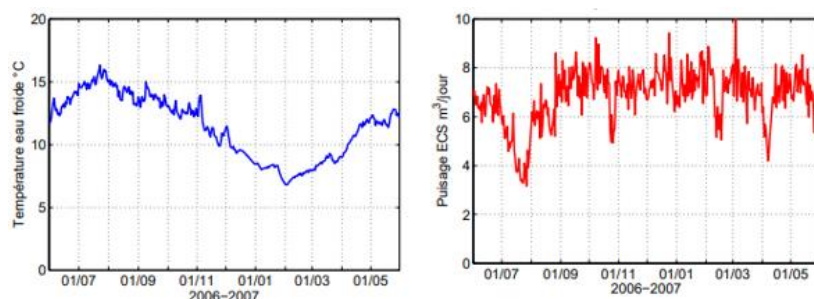


Fig. 5.6 : Évolution saisonnière de la température de l'eau froide dans la chaufferie du Pommier et le volume journalier d'ECS.

D'autre part, dû à la variation de la température de l'eau froide, le besoin d'énergie-chaleur pour l'ECS varie de façon saisonnière et culmine du simple en été au double en hiver, ainsi que le Mix avec le chauffage ambiant.

Mois	Q Ecs MJ	Q Ch MJ
juin 2006/07	25556	3514
juillet	16941	0
août	24301	2223
septembre	27695	744
octobre	29636	11927
novembre	30880	56343
décembre	34725	98090
janvier	35656	89638
février	31146	70166
mars	34455	65188
avril	27011	13169
mai	29645	8450
Total MJ/m ²	75.5	91.1

au Pommier (Zraggen, 2010)				
	chauffage	ECS	total	hrs
janvier	18%	10%	16%	340
février	16%	9%	14%	320
mars	16%	10%	15%	200
avril	5%	8%	6%	120
mai	5%	9%	6%	120
juin	1%	7%	3%	60
juillet	0%	5%	2%	60
août	2%	7%	3%	60
sept.	1%	8%	3%	60
oct.	4%	9%	5%	120
nov.	12%	9%	11%	200
déc.	20%	10%	17%	340
				2000

Fluctuation
Sinusoïdale

Tableaux 5.7 : MixC/E entre l'énergie pour le Chauffage ambiant et l'ECS du bâtiment Minergie (Zraggen 2010) [64]

En sortie du bouilleur-accumulateur, l'ECS à 55°C n'est pratiquement pas utilisée directement mais mitigée avec l'Eau Potable Froide (EPF). Via la boucle et la pompe de recirculation, elle est distribuée aux logements à une température moyenne d'environ 45°C (Td). La dissipation thermique dans la boucle de circulation de l'ECS mitigée peut être d'environ 5°C et est relativement constante toute l'année (température relativement stable dans les gaines techniques où cheminent les conduites). Dans les logements, l'ECS est ensuite mélangée à nouveau à l'eau froide à une température d'usage (Tu) d'environ 35-40°C et ceci tout au long de l'année.

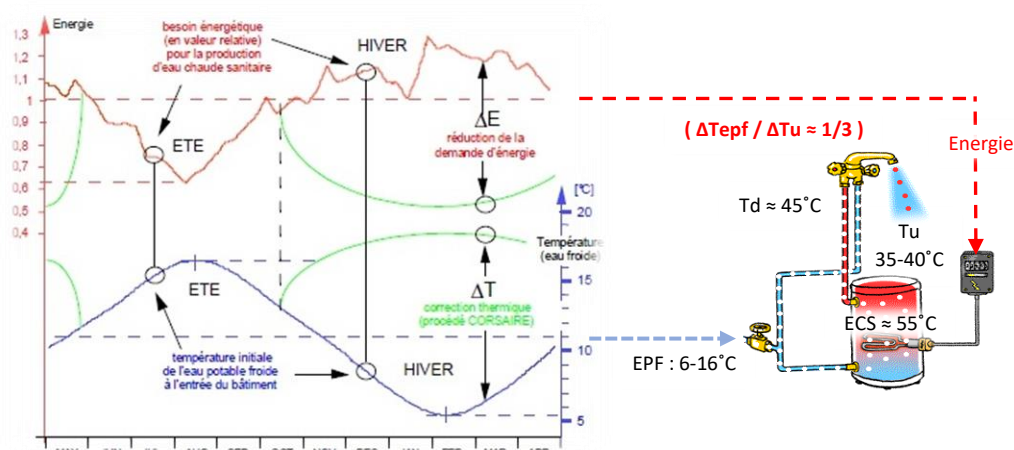


Figure 5.8 : Évolution saisonnière de la température du REP, du besoin de chaleur pour l'ECS et impact potentiel CORSAIRE

Illustré à la figure 5.8 ci-dessus, durant le semestre d'hiver, le free heating CORSAIRE peut substituer l'équivalent d'environ 1/3 des besoins de chaleur ($\Delta T_{epf} / \Delta T_u \approx 1/3$) pour la production d'Eau Chaude Sanitaire (ECS) ainsi que pour l'alimentation des lave-linges et lave-vaisselles (CEEB-2050).

À terme les besoins de chauffage (Q_c) des immeubles vont diminuer, due à la réduction de leur déperdition thermique (Minergie, HQE, etc.) et à la réduction du nombre de degrés-jours de chauffage et de jours de chauffage, induite par l'évolution climatique (-1,8 J/décennie, § 1 Fig. 1.2, source Météo Suisse). La part relative de l'énergie pour l'ECS (Q_e) va ainsi augmenter dans le futur et donc l'importance de l'impact de l'apport de CORSAIRE pour la juguler à l'ensemble du REP urbain et au-delà du périmètre du RTL [42].

5.4 Contribution de ULISSE avec le free heating CORSAIRE au réseau RTL

Contrairement au RTL GeniLac (30-45 km), les dimensions du REP du canton de Genève sont beaucoup plus importantes (> 1'200 km, 160'000 m³/j). La déperdition thermique du REP (non isolé) est par conséquent plus importante, en perdant environ 1/3 de sa température lors de sa distribution. À l'entrée des bâtiments il résulte néanmoins en un gain de 5 à 10 °C sur la température initiale en semestre d'hiver.

Par rapport à la situation de la 1^{ère} Extension du réseau RTL GeniLac + ULISSE en ECEEB-2050 (fig. 3.7), l'apport du procédé CORSAIRE peut fournir via le REP en hiver 35 GWh-t soit 30 % des 115 GWh-t pour l'ECS. Le réseau RTL GeniLac peut donc réduire sa quote-part de production d'ECS, ce qui remonte le mix Chauffage/ECS de 55/45 % à 63/37 %, avec un COPac mix 63/37% = 5,51 (TAB. 5.12, O-18) ainsi que le COPsys = 5,46 (TAB. 5.12, O-19).

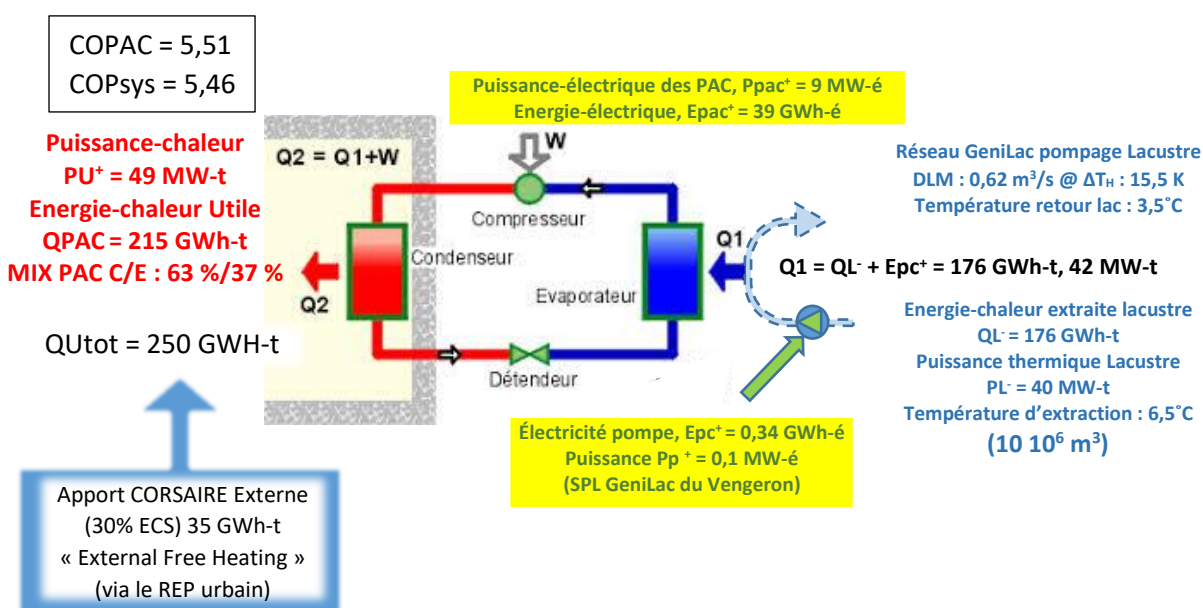


Figure 5.9 : Flux hivernaux d'eau et d'énergie pour les PAC en 1^{ère} Extension GeniLac + ULISSE + CORSAIRE (Externe)
(ECEEB-2050, Tab. 5.12, colonne O)

5.4.1 Variante d'intégration du free heating dans le bâtiment

Une variante du procédé de free heating CORSAIRE consiste à placer l'Échangeur de Chaleur à l'Intérieure (ECI) de la Sous-Station du Bâtiment (SSB). Ceci ne modifie pas l'impact sur la prestation des PAC et donc le COPac reste à 5,51.

La seule différence dans ce cas est que l'on n'utilise pas le REP urbain. L'apport thermique pour le free heating (Q_{cor}) est acheminé par le RTL GeniLac lui-même, ce qui augmente de 20 % le volume d'eau lacustre en circulation, passant ainsi d'environ 10 à 12 M m³. Étant donné que l'énergie de pompage hydraulique (EPH) représente moins de 1 % de celle des PAC (E_{pac}), l'augmentation de l'énergie hydraulique reste négligeable. Il en résulte que le COPsys (RTL) augmente en passant de 5,46 à 6,32 (Tab. 5.12, P-19) !

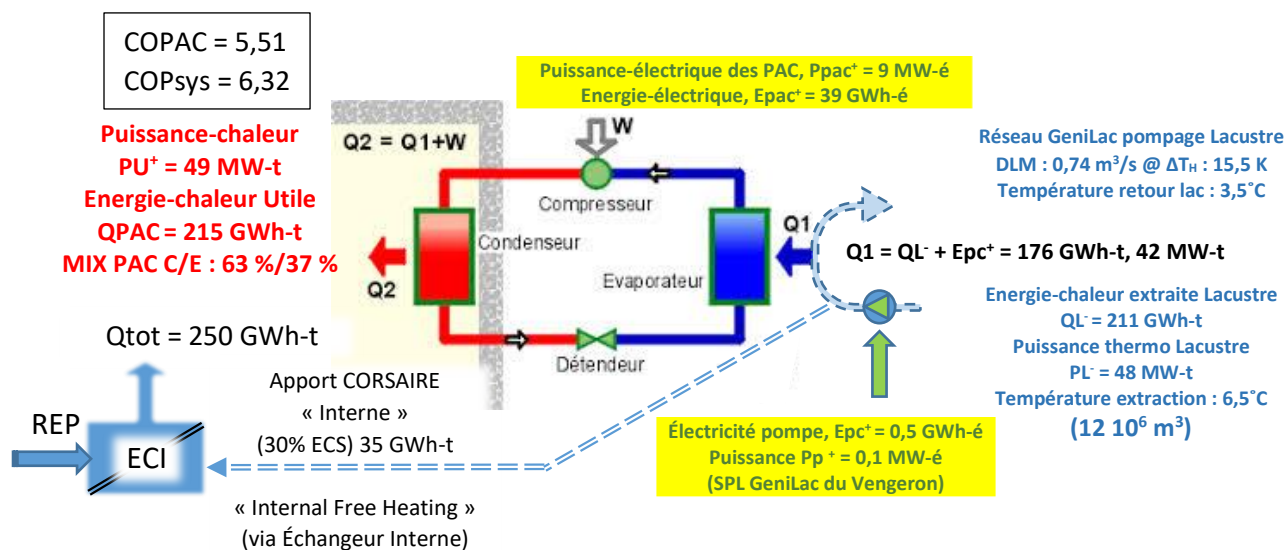


Figure 5.10 : Flux hivernaux d'eau et d'énergie pour les PAC en 1^{ère} Extension GeniLac + ULISSE + CORSAIRE (Interne)
(ECEEB-2050, Tab. 5.12, colonne P)

Cette variante (free heating Interne) est considérée ici du fait que le free heating par le REP urbain n'est pas nécessairement mise en place et que le REP s'applique à l'ensemble de l'agglomération urbaine, bien au-delà de la capacité du réseau RTL GeniLac. À titre d'exemple le REP du canton de Genève fait plus de 1'200 Km soit 40 fois plus important que le réseau GeniLac (30 km). Il a aussi un débit diurne de l'ordre de 2 à 3 m³/s.

L'apport de CORSAIRE - Externe, via le REP urbain (Fig. 5.11), n'implique pratiquement pas d'énergie électrique supplémentaire, autre que celle liée aux pertes de charges dans l'Échangeur de Chaleur CORSAIRE (ECC). Ceci, étant donné que l'eau potable est de toute manière transportée et distribuée à tous les immeubles de la ville.

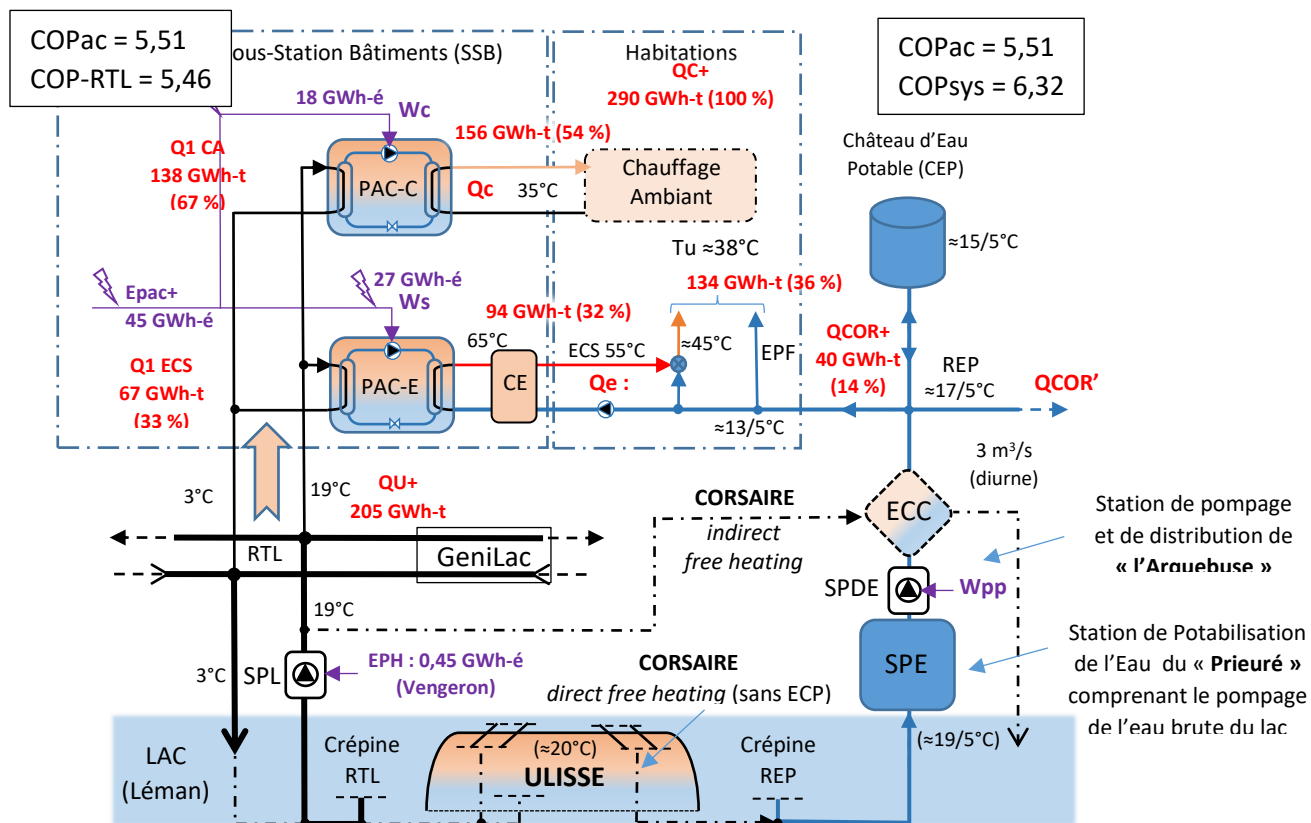


Figure 5.11 : Combinaison du Réseau RTL GeniLac en semestre d'hiver avec ULISSE & CORSAIRE Externe (ECEEB-2050)

5.5 Résumé et conclusions préalables pour le Réseau Thermo Lacustre GeniLac

La présente analyse d'impact énergétique, de l'intégration d'ULISSE et de CORSAIRE sur le RTL GeniLac pris en exemple, a comparé l'état actuel du système en question avec celle en 2050. Elle a tenu compte des conséquences du réchauffement climatique et des améliorations planifiées de l'efficacité énergétique du bâti (*Etat Climato Efficience Énergétique du Bâti*, ECEEB).

Préalablement il a été considéré que le réchauffement climatique (+ 2°C en 50 ans), d'ici 2050 augmente de 20 % le besoin de rafraîchissement (Climatisation) et réduit « passivement » de 20 % le Chauffage Ambiant (CA). De plus, l'amélioration de l'efficacité énergétique du bâti réduit « activement » le CA encore de 20 %. Finalement, en 2050 **le raccordement de tous les lave-linges et lave-vaisselles à l'Eau Chaude Sanitaire (ECS), ce qui en augmente de 20 % la demande, tandis que le procédé CORSAIRE fourni 30 % de l'ECS (ECEEB-2050).**

En fonctions de ces paramètres variables (ECEEB), sont identifiés et calculés notamment les éléments suivants :

- température de la source froide lacustre (Estival & Hivernal),
- volume, débit lacustre en circulation hydraulique dans le RTL et énergie électrique associée (EPH),
- énergie-chaleur lacustre (QL) convertie utile (Qf/c) et électricité absorbée pour dito par les PAC (Epac), situés dans les sous-stations des immeubles raccordés au RTL,
- performance des PAC (COPac : Qc/Epac) et du système RTL intégrant l'énergie hydraulique (COPsys)
- Coefficient de performance du point de vue du bâtiment (COPbat) comprenant l'apport d'ULISSE et de CORSAIRE urbain (Externe au RTL).

L'ensemble de ces données et des valeurs calculées sont reprises dans le tableau du **Tableau 5.12** ci-dessous et les graphiques différenciés (tableaux et figures : 3.4/5/6 ; 4.1/2/3/4 ; 5/9/10/11).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1				GeniLac Actuel (A)	GeniLac 2050 (B)	GeniLac 2050 (E)	Actuel 2050	2050	GeniLac-ULISSE-CORSAIRE	2em Extension								
2	GeniLac + ULISSE + CORSAIRE			(.100%)	(.100%)	(+20%)	(-40%)	(+20%)	Extension Réseau	ULISSE + ULISSE	ULISSE	ULISSE	Actuel	2050	2050	2050	2050	2050
3									(E) ≈ 1,28 x (B)	(A+U)	(B+U)	(E+U)	(A+U+C)	(B+U+C)	(E+U+C)	CORINT	Ext.COR	Ext.COR
4	Dénomination	Abbréviat	Unités	Froid	Chaud	Froid	Chaud	Froid	Chaud	Chaud	Chaud	Chaud	Chaud	Chaud	Chaud	Chaud	Chaud	Froid
5	Longueur Réseau Thermo Lacu	LRTL	km	30	30	30	30	38	38	30	30	38	30	30	38	38	45	45
6	Nombre Raccordements Bâtis	NRB	-	300	300	300	300	384	384	300	300	384	300	300	384	384	446	446
7	Temps réduit au régime Nomina	t	h	1240	1413	1236	1413	1236	1413	1445	1445	1445	1445	1445	1445	1445	1445	1445
8	Temps régime continu semestr	t	h	4380	4380	4380	4380	4380	4380	4380	4380	4380	4380	4380	4380	4380	4380	4380
9	Utilisateur Froid & Chaud	UF / UC	GWh-t	245	250	294	195	376	250	250	195	250	250	250	195	250	250	437
10	RTL-froid / -chaleur Utilisateur	QF / Qc	GWh-t	245	250	294	195	376	250	250	195	250	228	168	215	250	250	437
11	RTL-PAC-Mix Chauffage / ECS	Mix C/E	≈ % / ≈ %	-	70 / 30	-	55 / 45	-	55 / 45	70 / 30	55 / 45	55 / 45	77 / 23	63 / 37	63 / 37	63 / 37	-	-
12	RTL-PAC Chauffage Ambiant	QCA	GWh-t	-	175	-	105	-	135	175	105	135	175	105	135	135	156	-
13	RTL-PAC Eau Chaude Sanitaire	QECS	GWh-t	récup.(*)	75	récup.(*)	90	récup.(*)	115	75	90	115	53	63	81	81	94	récup.(*)
14	Apport CORSAIRE ECS (30 %)	QCOR	GWh-t	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23	27	35	35	40	-
15	Puissance Nominale RTL Utilist.	Pn	MW-t	198	198	196	185	251	204	691	686	697	684	679	687	-	694	188
16	Puissance Pointe RTL Utilist.	Pp	MW-t	78	80	94	62	120	80	80	62	80	73	54	69	-	80	140
17	Puissance Moyenne RTL Utilist.	Pm	MW-t	56	57	67	45	86	57	57	45	57	52	38	49	-	57	100
18	Coefficient Performance PAC	COPac	-	0	3,97	0	3,62	0	3,62	5,89	5,12	5,12	6,33	5,51	5,51	5,51	5,51	0
19	Coefficient Système (RTL)	COPsys	-	18	3,43	15	3,26	11	3,18	5,82	5,08	5,07	6,25	5,47	5,46	6,32	5,46	9
20	Coefficient Perform. Bâtiment	COPbat	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,87	6,35	6,34	6,32	6,33	-
21	Diff. Temp. lac free cooling	ΔT-f	°K	5	-	5	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5
22	Diff. Temp. lac Hiver (chauffage)	ΔT-c	°K	-	3	-	3	-	3	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	-
23	Débit Lacustre Nominal	DLM	m³/s	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
24	Débit Lacustre de Pointe	DLP	m³/s	3,96	4,52	4,81	3,45	6,15	4,37	1,02	0,77	0,99	0,94	0,68	0,87	1,04	1,01	7,41
25	Débit Lacustre Moyen	DLM	m³/s	2,83	3,23	3,43	2,46	4,39	3,12	0,73	0,55	0,71	0,67	0,48	0,62	0,74	0,72	5,30
26	Volume Lacustre	VL	M m³	45	51	54	39	71	49	128	9	11	11	8	9,8	11,7	11	84
27	Energie-Chaleur Evaporateur	Q1-tot	GWh-t	0	187	0	141	0	181	208	157	201	192	138	176	176	205	0
28	Energie-Chaleur Lacustre	QL	GWh-t	259	177	314	135	401,90	171	207	157	201	191	137	176	211	204	484
29	Puissance Lacustre Nominale	PLN	MW-t	209	125	209	125	209	125	648	648	648	648	648	648	648	648	209
30	Puissance Lacustre Pointe	PLP	MW-t	83	57	100	43	128,46	55	66	50	64	61	44	56	67	65	155
31	Puissance Lacustre moyen	PLM	MW-t	59	40	72	31	92	39	47	36	46	44	31	40	48	47	111
32	Puissance Pompe Nominale	PPN	MW-é	10,96	7,08	13,29	5,53	17,01	7,02	1,63	1,29	1,63	1,49	0,96	1,26	1,50	1,44	20,50
33	Puissance Pompe Pointe	PPP	MW-é	4,35	3,20	6,39	1,91	8,18	3,07	0,17	0,10	0,16	0,14	0,07	0,11	0,16	0,15	15,20
34	Puissance Pompe Moyenne	PPM	MW-é	3,11	2,28	4,56	1,36	7,48	2,19	0,12	0,07	0,12	0,10	0,05	0,08	0,11	0,10	10,86
35	Energie Pompe Hydraulique	EPH	GWh-é	14	10	20	6	33	10	0,52	0,31	0,51	0,44	0,20	0,34	0,49	0,45	48
36	Energie électrique PAC	EPac	GWh-é	0	63	0	54	0	69	42	38	49	36	30	39	39	45	0
37	Puissance Electrique Moyen.P	PEMpad	MW-é	0	14	0	12	0	16	10	9	11	8	7	9	9	10	0
38	Energie électrique Système	Esys	GWh-é	14	73	20	60	33	79	43	38	49	36	31	39	40	46	48

Tableau 5.12 : récapitulatif de l'impact de l'évolution de l'Etat Climatique et de l'Efficacité Énergétique du Bâti (ECEEB) pour le Réseau Thermo Lacustre (RTL) - GeniLac - seul et avec ULISSE et CORSAIRE

Les évolutions conjointes de l'ECEEB modifient l'indice de dépense de chaleur (IDC) en MJ/m² SRE (Surface de Référence Énergétique) spécifique au Rafraîchissement Estival (IDC-R_E) et au Chauffage Hivernal (IDC-C_H).

Pour les RTL, la fourniture d'énergie de Chauffage diminue pour chaque raccordement d'immeuble (IDC \searrow) et est compensée par une 1^{ère} Extension (+28 %) du réseau RTL (Tab. 5.12, colonne I) ; ceci pour rétablir la capacité initiale du réseau (Qc, ligne 10, 250 GWh-t).

Consécutivement, la fourniture totale de Froid (Qf, H-10) du réseau RTL augmente de 53 % par le cumul conjoint du réchauffement climatique (IDC-R \nearrow) et de la 1^{ère} Extension du réseau (+28 % Nombre de Raccordements de Bâtiments NRB, passant de 300 à 384, I-6).

Indépendamment de l'Extension du réseau RTL, les systèmes ULISSE et CORSAIRE n'agissent pas sur la fourniture de froid en *free cooling*. Néanmoins, la capacité de stockage d'ULISSE permet éventuellement de récupérer et de confiner le volume d'eau et de rejets de chaleur issues de la climatisation. Ceci permet de réduire l'impact négatif sur le lac et éventuellement d'augmenter la capacité de la climatisation thermo-lacustre de façon acceptable.

ULISSE impacte le bilan électrique estival qu'au niveau des pompes hydrauliques de chargement thermique des Réservoirs ULISSE et éventuellement des PAC pour l'augmentation de la température dans le cas d'un chargement desdits Réservoirs au lieu d'un rejet « dilutif » directement dans le lac ou le cours d'eau en aval.

Par rapport à GeniLac seul en 2050 (Tab. 5.12, colonne G) et malgré la 1^{ère} Extension du réseau, l'**apport hivernal d'ULISSE** (source froide lacustre à 18-20°C au lieu de 6,5°C) pour le Chauffage Ambiant (CA) et l'ECS, réduit le débit de 70 % (L-25) et le volume d'eau lacustre (L-26) et de 95 % l'énergie des pompes hydrauliques (EPH, L- 35). Par ailleurs, ULISSE augmente aussi de 41 % l'efficacité des PAC, le COPac (I-18 : **3,62** => **5,12** : L- 18) et de 59 % le COPsys (I-19 : **3,18** => **5,07** : L-19).

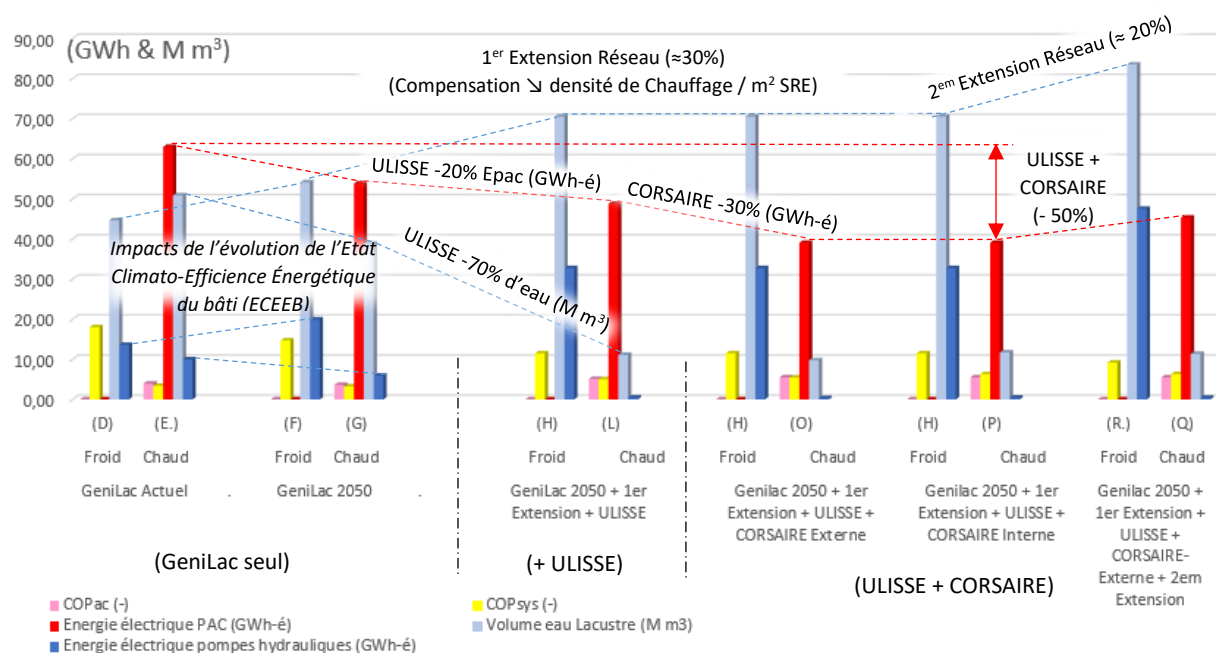


Fig. 5.13 : Comparatif énergétique du Froid (*free-cooling*) et du Chauffage (*chaud*), associés au volume d'eau lacustre (M m³) ainsi que l'électricité (GWh-é) des pompes - hydrauliques et de chaleur (PAC) appliqué à GeniLac seul et avec ULISSE et CORSAIRE

Concomitant à ULISSE en 2050, l'apport d'énergie-chaleur en « *free heating* » CORSAIRE contribue également aux gains d'efficacité. Du point de vue du réseau RTL, ces gains dépendent selon que le *free heating* est réalisé, soit par un échangeur de chaleur interne sur le réseau d'eau froide du bâtiment (CORSAIRE Interne au RTL, Tab. 22, colonne P), soit par le REP urbain (CORSAIRE Externe au RTL, Tab. 5.12, colonne O ou Q).

Indépendamment du mode d'apport (Interne et Externe), pour le bâtiment CORSAIRE réduit le besoin d'ECS et augmente relativement le Chauffage Ambiant ; le MixC/E passant de 55/45 à 63/37 (L-11 => O11). Du point de vue du réseau RTL et par rapport à ULISSE seul, le COPsys augmente de 8 %, (L-19 : **5,07** => **5,46** : O-19). Du point de vue global du bâtiment (RTL + REP) le COPbat (versus L-19) est de 25 % (L-19 : **5,07** => **6,33** : M-20 à Q-20).

Finalement, vis-à-vis de la 1^{ère} Extension de GeniLac en 2050 (colonne I), le cumule d'ULISSE avec CORSAIRE augmente de 100 % le COPbat (I-20 : **3,18** => **6,33** : M/Q-20).

Du point de vue de la performance énergétique du bâtiment, l'énergie électrique hivernal du réseau RTL (Esys) pour le Chauffage Ambiant et l'ECS diminuent de 50 % en 2050 grâce à la combinaison d'ULISSE et du *free heating* CORSAIRE. Ce dernier Externe via le REP urbain ou en Interne au bâti ou au réseau RTL avec ou sans extension (I-38 : 79 => 39 GWh-é : O-38) !

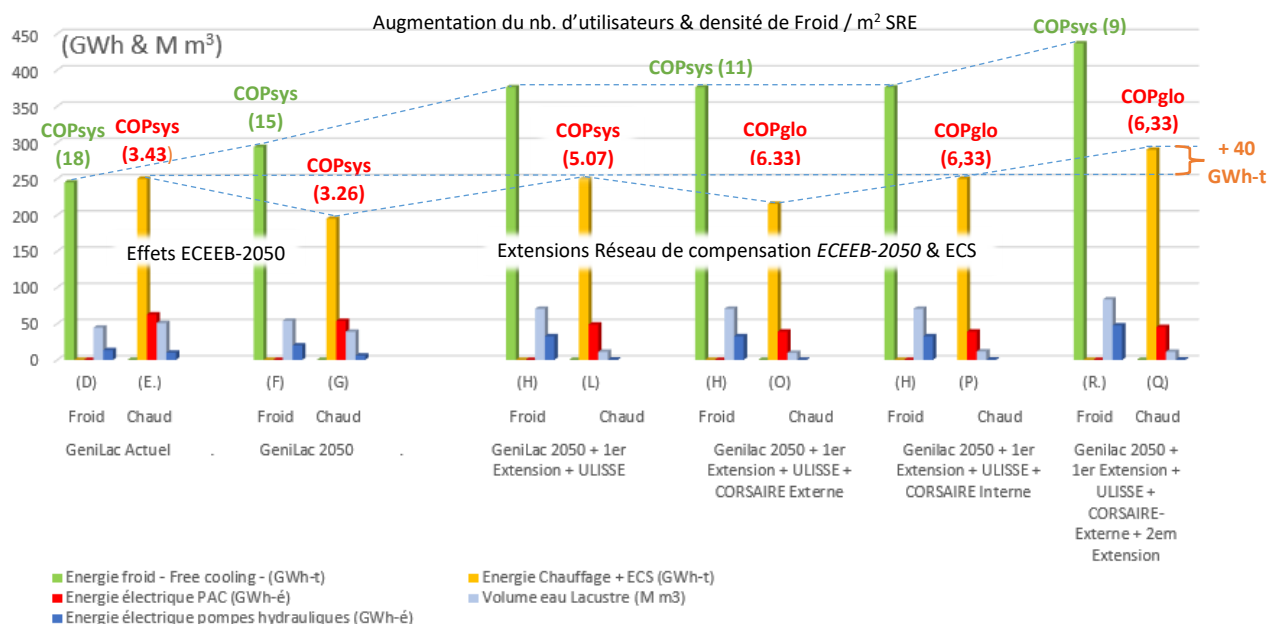


Figure 5.14 : Comparatif des flux énergétiques (GWh) et d'eau lacustre en circulation (M m³) pour le Froid (free-cooling) et le Chauffage (chaud), du Réseau Thermo Lacustre (RTL) appliqué à GeniLac – seul et avec ULISSE + CORSAIRE (free-heating).

Le gain d'énergie électrique pour les réseaux RTL a été calculé ici (de façon conservatrice) avec une source froide modérée à 19°C ; ceci avec les réservoirs ULISSE chargés initialement à 20°C par l'eau sommitale lacustre chauffée par le soleil estival. La température de captage et de stockage de l'eau peut être supérieure (> 20°C), voire être issue du retour de la climatisation (*free cooling*) ou d'autres sources de rejets thermiques (STEP, etc.).

En d'autres termes, ULISSE et le *free heating* CORSAIRE peuvent réduire potentiellement de plus de la moitié la consommation d'électricité hivernale des réseaux RTL tels que GeniLac.

Illustré encore sur la figure 5.14, d'ici 2050, avec l'augmentation de la demande de climatisation (D-9 => R-9) et de la 2^{ème} extension du réseau du RTL GeniLac (+50%), le COPsys du free cooling chute de moitié de 18 à 9 (D-19 => R-19). Ceci par l'augmentation de 87 % du volume (VL, D-26 => R-26) et du débit de pompage lacustre (DLM, D-24 => R-24). Toutefois, l'importante augmentation (350 %) concomitante de la consommation d'électricité du pompage hydraulique estival pour la climatisation (EPH, D-35/38 : 14 => 48 GWh-é : R-35/38) peut être absorbée par les excédents de production photovoltaïque (*peak-sheaving*).

Pour GeniLac et le Canton de Genève, l'intégration d'ULISSE à GeniLac représente une économie hivernale d'électricité de 40 GWh-é soit près de 20 % de la production hivernale de la centrale hydroélectrique de Vevrois sur le Rhône genevois ou plus de 133 % des 30 GWh hivernaux qui reviendrait à Genève pour le projet du Barrage transfrontalier de Conflan en aval de la centrale de Verbois (coût du barrage hydroélectrique de Conflan : 253 M CHF en 2016) [6].

Sur la base du prix de revient de l'énergie hydroélectrique en 2050 de l'étude de l'AES [16], entre une centrale au fil de l'eau et à accumulation, respectivement 19 et 32 ct/kWh (190 et 320 k CHF/GWh) l'économie financière des 40 GWh-é évités pour le canton de Genève serait entre 7,6 et 12,8 millions CHF/an.

5.6 Liaison du réseau RTL Genilac aux réservoirs ULISSE

Le procédé CORSAIRE concerne l'ensemble du REP du canton de Genève (> 1'200 km). Sa source thermique peut également venir de rejets thermiques industriels, p. ex. la principale Station de Traitement des Eaux usées du canton, la STEP d'Aire (2 m³/s). CORSAIRE avec le REP urbain genevois pourrait fournir durant le semestre d'hiver de l'ordre de 500 GWh-t nette directement à tous les immeubles, soit le double de GeniLac, et quasi sans infrastructure supplémentaire [6]. L'apport CORSAIRE « interne » au réseau RTL Genilac est quant à lui limité.

Pour la fourniture durant le semestre d'hiver des 250 GWh-t de GeniLac, avec ULISSE et CORSAIRE « interne » (l'échangeur de chaleur de « free heating » placé au départ du RTL ou à l'entrée de l'eau potable froide dans les bâtiments raccordés), le volume d'eau tempérée nécessaire aux PAC est de 12 M m³ (Tab. 5.12, ligne 26, colonne J-Q). Ceci correspond à 6 Réservoirs type ULISSE de 2 M m³ unitaire, avec un débit lacustre moyen (DLM, 25-Q) de 0,75 m³/s et un maximum de 1 m³/s au plus froid de l'hiver (DLP, 24-Q).

La profondeur de pose des Réservoirs ULISSE sur le fond lacustre est d'environ 65 m. Dans le Petit-Lac Léman, entre la diagonale Versoix – Hermance, la profondeur varie de 60 à 75 m. Un emplacement pour les 6 Réservoirs ULISSE serait possible à la hauteur d'Anières, sur l'axe central du Petit lac (frontière Genève-Vaud) (fig.5.15).

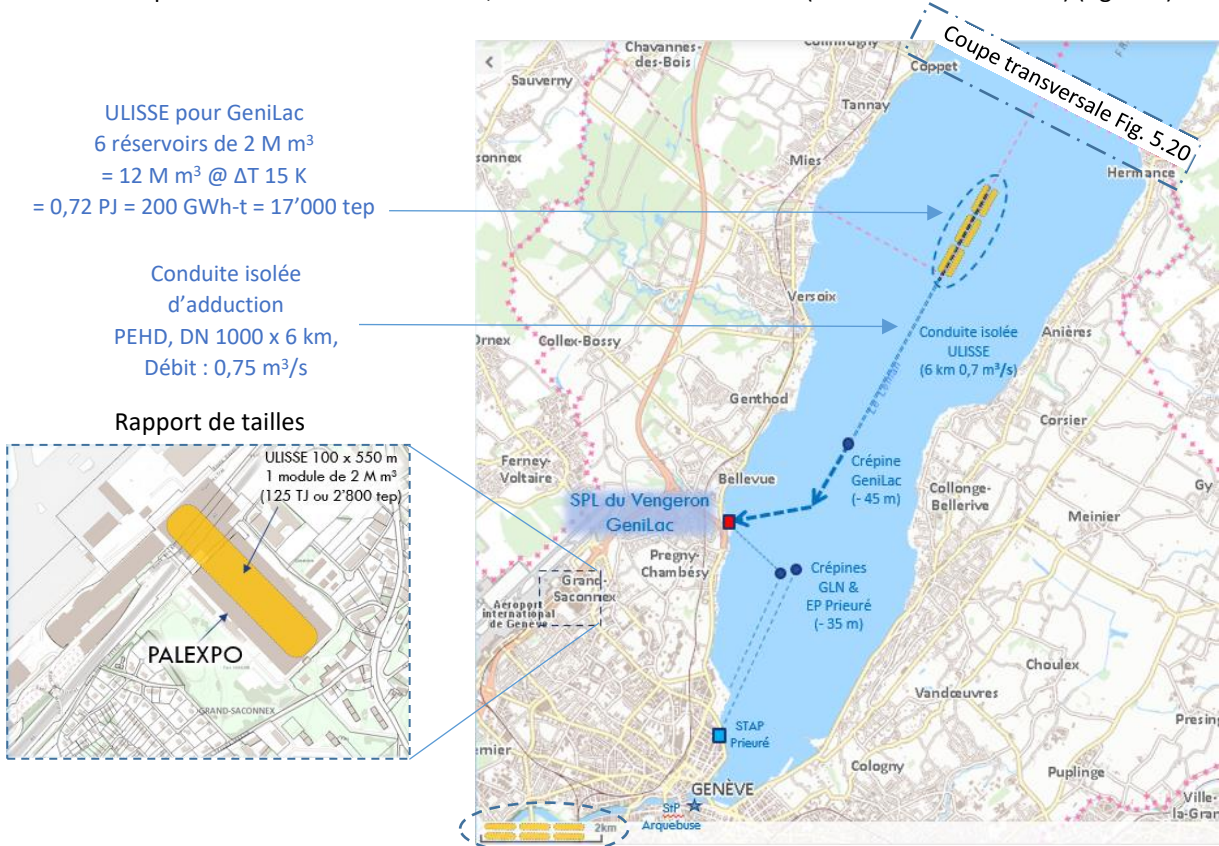


Figure 5.15 : Implantation des 6 Réservoirs ULISSE dans le Petit-Lac Léman pour GeniLac et en liaison avec la SPL du Vengeron.

La distance des Réservoirs ULISSE à la Station de Pompage Lacustre (SPL) de GeniLac du Vengeron est d'environ 6 km et à 4 km de la crépine d'aspiration de GeniLac. La conduite de liaison a donc une longueur d'environ 6 km. Avec un diamètre nominal (DN) de 1 m et un débit hydraulique (Dh) de 0,75 m³/s, les pertes de charges hydrauliques dans la conduite d'adduction en PEHD (Polyéthylène Haute Densité) sont d'environ 1 m C.E. (10⁻⁴ Pa) par km. Contenu des 6 km de longueur de la conduite, des raccords et coudes de liaison avec les réseaux internes aux Réservoirs ainsi que des crépines d'aspiration, la perte de charge totale (Δp) dans le circuit hydraulique est d'environ 10 m C.E. (10⁻⁵ Pa ou 1 bar). La puissance hydraulique (Ph) requise pour la circulation de l'eau dans la conduite d'adduction est le produit de la perte de charge (Δp) avec le débit hydraulique (Dh) :

$$Ph = \Delta p * Dh = 10^4 \text{ kg/m}^2 * 0,75 \text{ m}^3/\text{s} = 7'500 \text{ [kg.m/s]} \text{ ou } 73,5 \text{ [kW]} \quad (56)$$

$$\text{L'énergie hydraulique (Eh) est le produit de la puissance avec le temps (4'380h), soit } 0,32 \text{ [GWh]} \quad (57)$$

5.6.1 Isolation thermique de la conduite de liaison

La conduite de liaison en PEHD de calibre DN 1000 est une conduite pré-isolée de type « COOL-FIT 4.0 de +GF+ ». Ce type de tuyaux est généralement utilisé pour des applications de réfrigération commerciales et industrielles.

Le matériau de base en PE le rend particulièrement résistant à la corrosion et insensible au contact de l'eau. Son état de surface lisse lui confère de faibles pertes de charges (Δp). Le calibre (Diamètre Nominal) maximum disponible pour du COOL-FIT 4.0 est actuellement du DN 450 (mm). Il a une épaisseur d'isolation (mousse GF HE) de 4 cm avec un coefficient de transfert de chaleur (λ_i) de 0.026 W/m.K (source GF). La longueur unitaire standard de fabrication est de 12 m. Les différentes sections de tuyau sont assemblées par soudage thermoélectrique ou à l'aide de raccords boulonnés. Une exécution spéciale en DN 1000, éventuellement avec une épaisseur d'isolation différente, est indispensable.

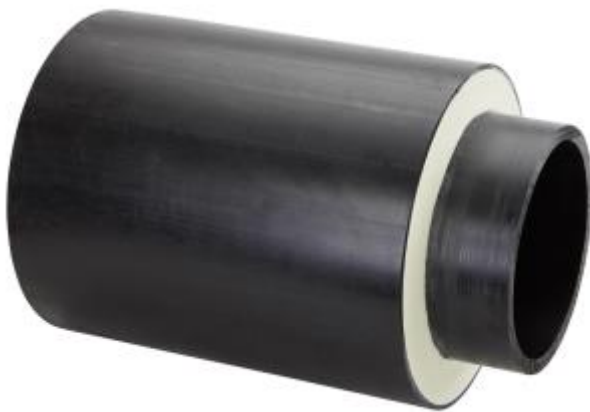


Fig. 5.16 : Tuyau pré-isolé en PEHD type COOL-FIT 4.0 de +GF

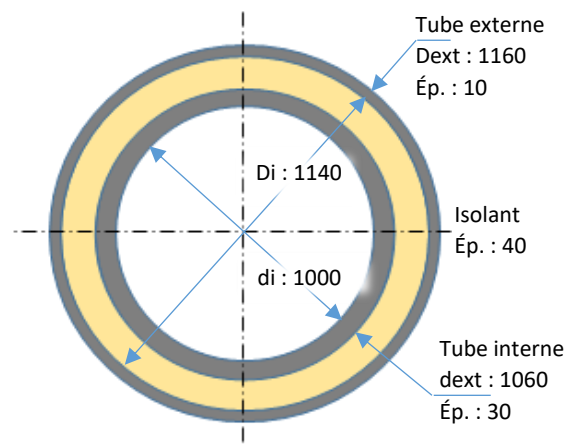


Fig. 5.17 : Dimensions théoriques pour tuyau DN 1000 (mm)

5.6.2 Calcul de la déperdition thermique de la conduite d'adduction

La puissance thermique (P_t) dissipée par la conduite d'adduction (DN 1000 x 6 km) est produite par la différence de température (ΔT) entre celle au fond du lac (TL) et celle de l'eau en provenance des réservoirs ULISSE (TU). Elle est également fonction de la Conductibilité circulaire (K_c) de la conduite triple-couches (PEint/Isol/PEext) :

$$P_t = \Delta T * K_c L = (T_U - T_L) * K_c L = 15 \text{ K} * 17 \text{ KW/K} = 255 \quad [\text{KW}] \quad (58)$$

$$\text{avec } K_c = 2 \cdot \pi \cdot L * \left(\frac{\lambda}{\ln(R_{\text{ext}}/R_{\text{int}})} \right) \Rightarrow 2 \cdot \pi \cdot L * \left(\frac{\ln(R_2/R_1)}{\lambda_{pe}} + \frac{\ln(R_3/R_2)}{\lambda_i} + \frac{\ln(R_4/R_3)}{\lambda_{pe}} \right) = 17 \text{ [KW/K]}$$

$$\text{avec } R_1 = d_i/2 = 0,5 \text{ m} ; R_2 = d_{\text{ext}}/2 = 0,53 \text{ m} ; R_3 = D_i/2 = 0,57 \text{ m} ; R_4 = D_{\text{ext}}/2 = 0,58 \text{ m}$$

$$\text{L'énergie thermique } (Q_t) \text{ est le produit de la puissance avec le temps (4'380h), soit } 1,12 \text{ [GWh]} \quad (59)$$

5.6.3 Transport, immersion et pose de la conduite d'adduction sur le fond lacustre

L'immersion et la pose sur le fond lacustre de la conduite d'adduction, à une profondeur d'environ 70 m, la soumette à une pression hydrostatique de $7 \cdot 10^5$ Pa (7 bar). Le PEHD résiste parfaitement à ce niveau de pression qui s'équilibre par ailleurs de part et d'autre des parois interne/externe. L'isolation thermique (HE) est également soumise à cette pression de compression, à priori supportable, et qui n'est normalement pas exposée à l'eau. Toutefois, une intrusion d'eau dans l'isolant en affecterait ces propriétés thermiques ($\lambda_i \nearrow$), voire altérerait à long terme le matériau de base.

Une parade à l'introduction parasite d'eau, via une fissure dans la paroi de l'enveloppe interne ou externe en PEHD, consisterait à mettre sous une légère surpression d'air ou d'azote l'espace inter-tubes de l'isolant. Ceci selon le même principe de protection par pressurisation d'air (21-22) que pour les enceintes des groupes motopompes immergées du dispositif de chargement estival des réservoirs ULISSE (figure 7.6).

La procédure de pose de la conduite d'adduction en Polyéthylène Haute Densité (PEHD) est très similaire à celle du réseau MorgesLac (Léman) ou du DLWC de Toronto⁴ (Fig. 5.18 et 5.19 ci-dessous) [51, 52, 53]. La conduite est assemblée soudage thermoélectrique et est remorquée sur le lac par simple flottaison, avec ses plots en béton déjà accrochés pour le lestage sur le fond lacustre. Pour l'opération, la conduite est bouchée à ses extrémités qui la maintient vide d'eau. Un fois arrivée sur place, elle est progressivement remplie d'eau ce qui la fait descendre vers le fond lacustre.



Fig. 5.18 Transport (lac Ontario) de la conduite en PEHD (\varnothing 1,6 m x 15 km !) de pompage et d'adduction de l'eau du Réseau hydrothermique lacustre de rafraîchissement (DLWC) de la ville canadienne de Toronto (image Enwave)

Fig. 5.19 : Pose de la conduite en PEHD de 1'500 m du réseau MorgesLac à une profondeur de près de 45 m au niveau de la crépine d'aspiration (production : 3,3 GWh pour le chauffage et 1 GWh de froid de climatisation).

La pose à 80 m de profondeur en 2003 de 15 km de conduites de DN 1600 (!) dans le Lac Ontario avait coûté 50 millions de dollars. Transposée 20 ans plus tard, au 6 km pour GeniLac (DN 1000 x 6 km) dans le Petit Lac Léman (Fig. 5.15), cela représenterait proportionnellement 12,5 M CHF, soit environ 2 M CHF/km de tuyau.

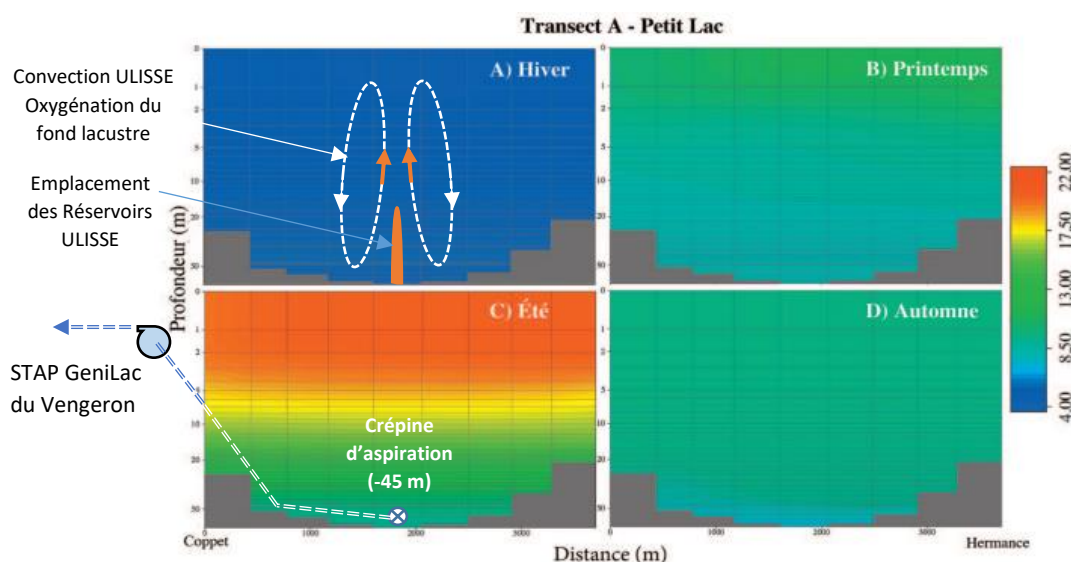


Figure 5.20 : Distribution verticale de la température de l'eau (°C) dans le transect A (Fig.2), Petit-Lac (Coppet - Hermance): (A) hiver (9 février 2005), (B) printemps (20 avril 2005), (C) été (29 juillet 2005) et (D) automne (26 novembre 2005). L'échelle logarithmique en profondeur (!) est utilisée pour mettre en évidence l'évolution de la thermocline. Source : Structure thermique et courantologie du Léman, Anh Dao LE THI 1, *, Francesca DE PASCALIS2, Georg UMGIESSER2 and Walter WILD1, Arch.Sci. (2012) 65 :65-80 |[23]

⁴ <https://www.enwave.com/case-studies/enwave-and-toronto-water-tap-into-innovative-energy-source/>

5.6.4 Investissements contenus et pérennisés pour GeniLac par ULISSE et CORSAIRE

En chiffres ronds, les émissions annuelles de CO₂ du parc immobilier genevois sont de 2 MtCO₂ (bilan 2012)⁵. GeniLac c'est 70 kt CO₂ de réduction escomptée pour 2035, soit 3,5 % du bilan CO₂ « bâtiment » du canton.

La réduction des émissions de CO₂ de GeniLac est due à l'effacement du combustible fossile pour le chauffage et l'ECS et dans une moindre mesure liée à la réduction d'électricité par le *free cooling* estival ; ceci du fait que l'électricité estivale est à priori moins « carbonée ». L'enjeu climatique majeur, de la réduction des émissions de GES et de la maîtrise de la consommation électrique, est donc essentiellement situé en semestre d'hiver.

Dans le secteur du bâtiment en Suisse, les besoins d'énergie de chauffage sont supérieurs à ceux pour le rafraîchissement de confort, à l'exception du froid commercial et de procédés techniques qui sont en pleine expansion (datacenters, frigos, hôpitaux, bureaux, magasins, etc.). Le système GLN et son extension GeniLac, basés sur la capacité thermo lacustre, sont une réponse efficace à grande échelle pour le rafraîchissement estival par *free cooling* et le chauffage des bâtiments par les « *ascenseurs thermiques* » que sont les PAC.

Néanmoins pour le chauffage hivernal et l'ECS, il est plus contraint par la cascade d'impacts technico-économiques (investissement & exploitation), dont un plus faible différentiel de température pour l'extraction de chaleur du lac (ΔT_c : 3 K) par rapport à celui du rejet de chaleur pour le *free cooling* (ΔT_f : 5 K), impliquant des débits importants d'extraction et de circulation d'eau lacustre ainsi que le recours aux PAC énergivores.

L'investissement pour GeniLac est de 800 M CHF dont 100 M CHF pour la principale station de pompage lacustre (SPL) du Vengeron d'une capacité nominale de 10 m³/s. Une part importante de l'infrastructure et de son investissement est imputable aux sous-stations décentralisées dans les bâtiments (SSB), comprenant principalement les échangeurs de chaleurs pour le *free cooling* (estival) et les PAC (essentiellement hivernaux).

Avec l'évolution de l'État Climato Efficience Énergétique du Bâti (ECEEB), le facteur limitant du réseau RTL GeniLac n'est pas la capacité thermique du lac⁶, ni celle de l'SPL. D'ici 2050, pour une application du système ULISSE associé à CORSAIRE en interne avec GeniLac, la capacité de l'SPL resterait suffisante pour assurer la climatisation par *free cooling* estival, avec une réserve de pointe 25 % (DLP : 7,4 m³/s). Ceci nonobstant une extension de 50 % du réseau RTL, en longueur (30 => 45 km) et en nombre de raccordements (300 => 450).

En outre, dès lors que les rejets de chaleur de la climatisation, dans le Léman ou en aval dans le Rhône, devraient être supprimés et introduits dans les Réservoirs ULISSE, le débit et le volume d'eau peuvent encore être réduits en augmentant la température au moyens des PAC disponibles en été.

Pour la fourniture des 250 GWh-t de chaleur en semestre d'hiver, avec un débit lacustre moyen de 0,75 m³/s (DLM, 25-Q) et un maximum de 1 m³/s (DLP, 24-Q) au plus froid de l'hiver, il reste encore une réserve de 90 % de la capacité de l'SPL et du réseau primaire d'adduction (RTL). Autrement dit, grâce à ULISSE et CORSAIRE-Interne (au RTL), l'infrastructure de base de GeniLac pourrait potentiellement fournir 2'500 GWh-t. Associé aux 500 GWh-t fournies en *free cooling* CORSAIRE-Externe (via le REP), on totaliserait 3'000 GWh-t soit pratiquement les besoins de chaleur pour les bâtiments du canton de Genève.

En outre, le *free heating* CORSAIRE (externe au RTL GeniLac) bénéficie d'un *effet d'aubaine* qu'est l'usage du réseau public d'eau potable (REP) raccordé à l'ensemble du bâti de l'agglomération urbaine.

Au final, selon la thèse de Loïc Quiquerez de 2017 [8], en fonctions des scénarios, la demande totale de chaleur du canton de Genève en 2035 serait déjà comprise entre 4'150 GWh (BAU) et 3'368 GWh (EE+), en tout cas inférieure à celle de 2014 (4'414 GWh/an). En 2014 les Réseaux Thermiques représentaient seulement 10 % du marché de chaleur (430 GWh). En triplant en 2035 leur part de marché (dans laquelle GeniLac initialement compterait pour environ 28 %) et moyennant des mesures parallèles permettraient d'atteindre les objectifs cantonaux d'approvisionnement thermique des bâtiments.

⁵ PLAN CLIMAT CANTONAL – Volet 2 du 20 décembre 2017 / page 6, Fig.2 : Bilan carbone et objectifs de réduction

⁶ Viquerat P-A. 2012. Utilisation de réseaux d'eau lacustre profonde pour la climatisation et le chauffage [46]

Étude de cas : le projet GLN (Genève-Lac-Nations) à Genève, Thèse de doctorat n° 4448, Université de Genève.

6 Potentiel national d'implantation et d'économie d'électricité par ULISSE et CORSAIRE

6.1 Potentiel national d'ULISSE et CORSAIRE en « interne » (via le RTL)

Au stade de la présente étude exploratoire, avec des données parcellaires sur l'état et l'évolution démographique et de la situation des agglomérations urbaines, l'estimation du potentiel d'ULISSE et CORSAIRE ne peut être qu'approximative, au mieux un objectif pour 2050. Ceci sachant qu'il ne faut pas considérer que plus rien ne resterait à faire après 2050 ou que le changement climatique s'arrêterait. On peut néanmoins catégoriser trois cas de figure et poser des hypothèses qui resteront à valider par la suite.

En 2050 (ECEEB), dans l'hypothèse d'une généralisation du chauffage ambiant et de la production d'ECS via des réseaux RTL des « *agglomérations urbaines des 15 grands Lacs* », (1/4 de la population suisse : $Q_c = 50$ PJ/an de chaleur pour un total de 200 TJ), l'énergie électrique hivernale (E_{sys}) pour alimenter les pompes à chaleur (PAC) et les pompes hydro-lacustres (PHL) serait de 15,3 PJ (6.4 TWh-é, avec $COP_{sys} = 3,26 \Rightarrow$ TAB. Fig. 22, G19).

L'association de ces réseaux RTL avec ULISSE et CORSAIRE (Interne/Externe) permettrait un gain de 50 % par un $COP_{bât} = 6,34$ (TAB. Fig. 22, O-20), soit une économie d'énergie électrique hivernale de 2,1 TWh-é (ΔE_{sys}) :

$$\Delta E_{sys} = (Q_c / COP_{bât}) - (Q_c / COP_{sys}) = (50 \text{ PJ} / 6.34) - (50 \text{ PJ} / 3.26) = 7,45 \text{ [PJ]} \text{ ou } 2,07 \text{ [TWh-é]} \quad (52)$$

Avec un gain équivalent au RTL GeniLac (≈ 40 GWh-é avec 12 M m³ de Réservoirs ULISSE), les 2,07 TWh-é nécessiteraient 310 Réservoirs type ULISSE de 2 M m³ unitaire :

$$\text{Nombre de Réservoirs ULISSE (NRU@2 M m}^3\text{)} = (2,07 \text{ TWh-é} / 40 \text{ GWh-é}) * 12 \text{ M m}^3 = 621 \text{ M m}^3 = 310 \text{ [NRU]} \quad (53)$$

Les 310 Réservoirs ULISSE totaliseraient près de 17 km² d'emprise (invisible) sur les fonds lacustres, soit 0,83 % de la surface totale des 15 grands lacs (> 10 km²). Ces grands lacs totalisent une surface de 2'024 km² dont 1'233 km² sur le territoire Suisse. Les 621 M m³ d'eau stockée dans les 310 Réservoirs ULISSE représentent une lame d'eau de 30 cm d'épaisseur répartie sur les 2'024 km² de ces 15 grands lacs représentés sur la carte Suisse à la figure 6.1 ci-dessous.

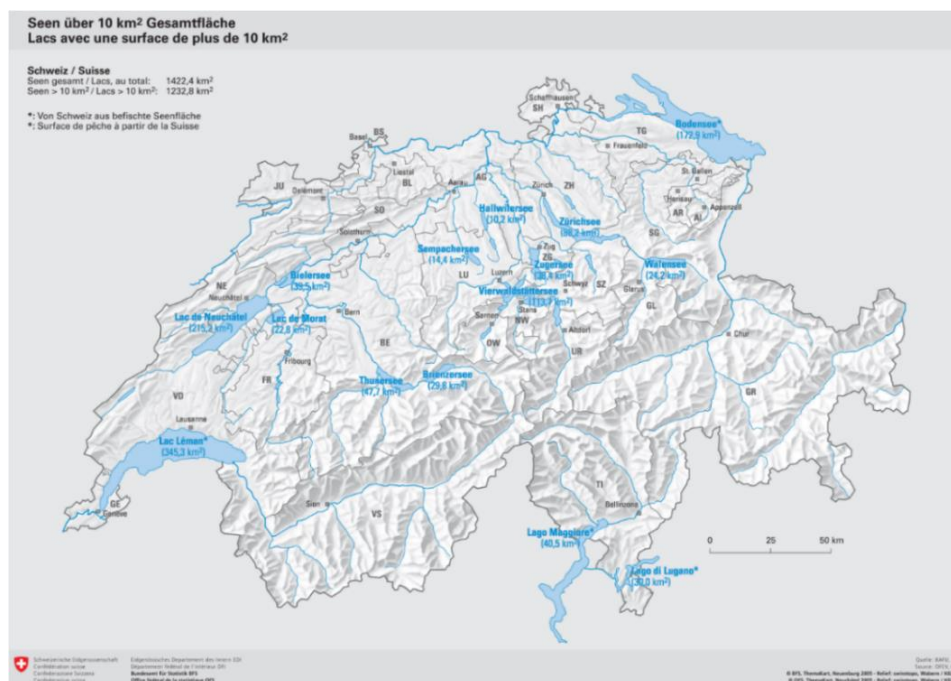


Fig. 6.1 : Les 15 grands lacs suisses, d'une surface supérieure à 10 km², compatibles pour les Réservoirs ULISSE (source : OFS)

Pour mettre en perspective, les 17 km² d'emprise (invisible) sur les fonds lacustres de 310 Réservoirs ULISSE (NRU) représentent 11% des 150 km² de surface des 30 GW-p de panneaux photovoltaïques encore à installer pour fournir les 30 TWh-é d'énergie électrique supplémentaire d'ici 2050 (150 km² \approx 1/4 des 580 km² de la surface du Léman).

Une répartition de 310 Réservoirs ULISSE sur les 15 grands lacs suisses représente une moyenne d'environ 21 Réservoirs/lac. Plus précisément, dans le Tableau 6.2 ci-dessous, on peut établir une 1^{ère} répartition théorique du nombre de Réservoirs ULISSE (NRU) au prorata de la surface de ces 15 grands lacs.

Cependant, celle-ci n'est pas nécessairement un critère suffisant. Elle doit aussi être évaluée en fonction de la population « riveraine » aux lacs et pouvant être bénéficiaire du système ULISSE notamment au travers des réseaux RTL ; évaluation qui reste à faire (?)

	Nom	Volume par lac (km ³)	Surface totale (km ²)	Surface Suisse (km ²)	Surface Suisse (% vs les lacs)	Répart. ULISSE (NRU/surf.CH. lac)	Répart. ULISSE (NRU / habitants)	Volume ULISSE (% vs lac)	Surface ULISSE (% vs lac)
1	Lac Léman (CH, FR)	89	580	345,3	28,7	87	?	0,20	0,81
2	Lac de Constance (CH, D, AT)	48	539	172,9	26,6	43	?	0,18	0,44
3	Lac de Neuchâtel	14	215	215	10,6	54	?	0,77	1,36
4	Lac Majeur (CH, IT)	37	212	40,5	10,5	10	?	0,06	0,26
5	Lac des Quatre Cantons	11,8	114	114	5,6	29	?	0,49	1,36
6	Lac de Zurich	3,9	88	88	4,3	22	?	1,13	1,36
7	Lac de Lugano (CH, IT)	6,5	49	30	2,4	8	?	0,23	0,83
8	Lac de Thoune	6,5	48	48	2,4	12	?	0,37	1,36
9	Lac de Bienne	1,1	40	40	2,0	10	?	1,80	1,36
10	Lac de Zoug	3,2	38	38	1,9	10	?	0,60	1,36
11	Lac de Brienz	5,2	30	30	1,5	8	?	0,29	1,36
12	Lac de Walenstadt	2,5	24	24	1,2	6	?	0,48	1,36
13	Lac de Morat	0,6	23	23	1,1	6	?	2,10	1,36
14	Lac de Sempach	0,7	14	14	0,7	4	?	1,07	1,36
15	Lac de Hallwil	0,3	10	10	0,5	3	?	1,80	1,36
Totaux :		230,2	2 024	1 233	100,00%	310	310	0,20	0,83

Tableau 6.2 : Répartition du Nombre de Réservoirs ULISSE (NRU) dans les 15 grands lacs au prorata des surfaces (Quid d'une répartition en fonction de la populations riveraines ?)

À titre d'exemple pour le Léman, illustré à la figure 6.3 ci-dessous, la carte bathymétrique montre que le fond lacustre comporte une surface de 68 Km² (couleur verte) où la profondeur est comprise entre 50 et 75 m, équivalent à 1'200 Réservoirs type ULISSE de 54'000 m² unitaire d'emprise sur le fond lacustre. L'installation réelle de 87 Réservoirs ULISSE dans le Léman (Tableau fig.6.2, ligne 1) représenterait 4,7 km² ou 0,8 % d'emprise sur le fond lacustre (580 km²) et 0,2 % du volume (89 10⁹ m³), de manière invisible et neutre pour la navigation (p. ex. CGN).

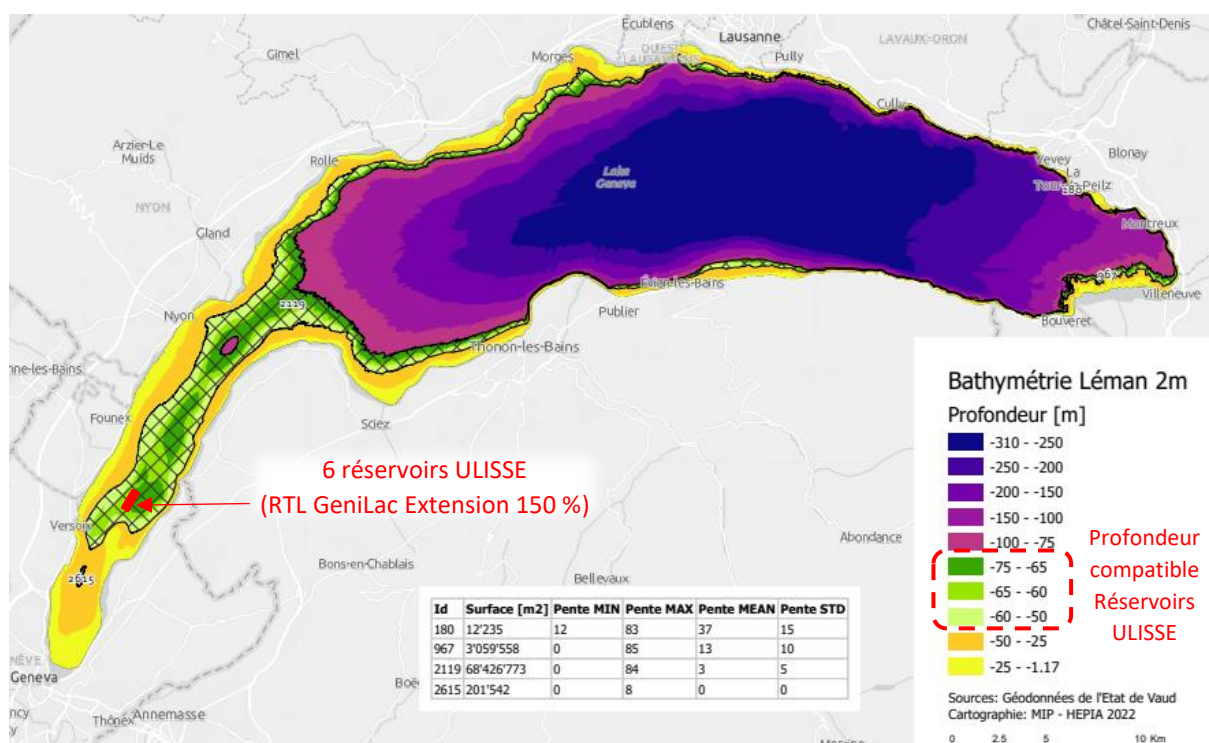


Fig. 6.3 : Bathymétrie du Léman. Zones vertes (50-75m) : profondeur compatible pour l'implantation de Réservoirs type ULISSE (surface zone verte : 68 M m² => 1'200 Réservoirs ULISSE @ 54'000 m²) (source carte : Prof. Alain Dubois, HEPIA 2022).

6.2 Potentiel national de CORSAIRE Externe (via le REP hors RTL ou régions lacustres)

Comme décrit précédemment, le procédé free heating CORSAIRE peut exploiter les rejets thermiques produits durant le semestre d'hiver, tels que par exemple ceux de la chaleur résiduelle en sortie des stations de traitement des eaux usées (STEP) [4]. L'utilisation du REP par CORSAIRE en amont avec la chaleur des STEP est donc plutôt logique d'autant plus que leurs flux respectifs sont concomitants.

Le free heating CORSAIRE ne nécessite donc pas impérativement d'un stockage saisonnier type ULISSE ou d'infrastructure autre que le REP existant. Il peut ainsi s'affranchir des régions des grands lacs et être accessible à toutes les autres agglomérations urbaines d'une densité toutefois suffisante compatible à l'installation de l'échangeur de chaleur CORSAIRE sur le REP urbain.

Pour une 1^{ère} estimation du potentiel, on fait l'hypothèse conservatrice qu'en 2050 la moitié (P1 : 0,5) des immeubles ne sont pas raccordés ou inadaptés au système ULISSE et CORSAIRE, pour diverses raisons (densité trop faible, bâtiment éloigné, source de chaleur insuffisante ou inadaptée, etc.). En déduisant le 1/4 (P2 : 0,25) des immeubles bénéficiant déjà d'ULISSE (régions lacustres), il reste 1/4 (P3 : 0,25 = 1 - P1 - P2) de la population suisse bénéficiant de 30 % (P5 : 0,3) de l'énergie pour l'ECS (Q-ECS3) via le free heating CORSAIRE et le REP urbain.

Alors que pour la totalité de la population suisse, la demande d'énergie-chaleur du Chauffage Ambiant et de l'ECS (Qcn) est en 2050 de 200 PJ, celle de la partie (P3) vaut : $Qc3 = 0,25 * (Qcn) = 50 \text{ PJ}$. Selon le MixC/E du tableau 5.12, ce sont 45 % (P4 : 0,45) de la chaleur Qc3 qui servent pour Q-ECS3 = $0,45 * Qc3 = 22,5 \text{ PJ}$. Finalement, l'apport CORSAIRE (Q-cor) correspond à 30 % (P5 : 0,3) de l'énergie-chaleur pour Q-ECS3.

$$Q\text{-cor} = Qcn * P3 * P4 * P5 = 200 \text{ PJ} * 0,25 * 0,45 * 0,3 = 6,75 \quad [\text{PJ}] \quad (54)$$

Les 6,75 PJ de chaleur fournie par le free heating CORSAIRE pour l'ECS (Q-ECS3) seraient (sans CORSAIRE) normalement produits par les pompes à chaleur PAC. Avec un COPac-ecs de 2,73 (supposé identique aux PAC des RTL du tableau 4.1, E-7), ils auraient absorbé 1,15 TWh-é d'énergie électrique. Ce sont donc autant d'énergie électrique économisée ($\Delta Ecor$) par la fourniture nette de Q-ECS3 en free heating CORSAIRE :

$$\Delta Ecor = 6,75 \text{ PJ} / 2,73 = 2,47 \quad [\text{PJ}] \quad 0,69 \quad [\text{TWh-é}] \quad (55)$$

6.3 Potentiel national d'économie d'électricité et d'investissement par ULISSE et CORSAIRE

Avec ces hypothèses conservatrices (ou d'objectifs) pour 2050, le 1/4 de la population suisse (régions lacustres) bénéficierait d'ULISSE associé au free heating via les réseaux RTL (CORSAIRE interne) et qu'un autre 1/4 de la population (hors régions lacustres) bénéficierait de CORSAIRE seul, en free heating externe via les REP urbains.

L'ensemble ULISSE (52) et CORSAIRE (55), en fournissant 57 PJ de chaleur (soit près de 30 % des besoins nationaux), constituent alors potentiellement une Économie d'Électricité Hivernal (EEH) de 2,76 TWh-é nette.

$$EEH = \Delta E_{\text{sys}} + \Delta E_{\text{ecs}} = 2,07 \text{ TWh-é} + 0,69 \text{ TWh-é} = 2,76 \quad [\text{TWh-é}] \quad (56)$$

Compte tenu des pertes de transformation et de transport de l'énergie électrique hivernale, de 10 % (7 % en moyenne annuelle), les 2,76 TWh-é nets nécessitent une production brute de 3 TWh-é soit 1/3 du déficit structurel hivernal d'électricité en 2050 (9 TWh-é). C'est l'équivalent de la production hivernale brute en sortie d'usine de 2 Complexes hydroélectriques d'accumulation de Grande-Dixence (CGD) en 2050.

Selon l'étude de l'AES [16], le coût de revient électrique d'une centrale à accumulation en 2050 sera de 32 ct/kWh ou 320 M CHF/TWh (tableau 6.4 ci-dessous). Il en résulte que l'économie de production des 3 TWh-é constitue aussi une Économie Financière Annuelle (EFA) de 1'312 M CHF/an, dont en gros 3/4 par ULISSE (via les RTL) et 1/4 par le free heating CORSAIRE « externe » (via le REP urbain) :

$$EFA = EEH * 32 \text{ ct/kWh} = 3 \text{ TWh} * 320 \text{ M CHF/TWh} = 960 \text{ [M CHF]} \quad (57)$$

Par ailleurs, selon cette même étude AES, Le coût d'Investissement Évité (CIE) de la construction équivalente de 2 Complexes G-D (CGD) est de : $CIE = 2 \times 2'000 \text{ MW}^7 \times 4,75 \text{ M CHF/MW} = 19 \text{ [G CHF]} \quad (58)$

Coûts des constructions et des transformations en 2015, 2035 et 2050		
	Centrale au fil de l'eau	Centrale à accumulation
Coûts d'investissement [CHF/kW]	5300	4750
Exploitation et entretien par an	1% des coûts d'investissement	0,5% des coûts d'investissement
Redevance hydraulique [ct./kWh]	1,1	1,1
Coûts de revient [ct./kWh]	10–19	17–32

Tableau 6.4 : Coûts des nouvelles constructions et des transformations au fil des étapes de la Stratégie énergétique 2050
(Source : Grande hydraulique, AES, juillet 2020) [16]

Le potentiel d'ULISSE corrobore la *Prise de position* de mai 2022 [41] du *Forum Stockage d'énergie Suisse* (FESS), qui démontre que le stockage saisonnier de chaleur, non seulement peut réduire la dépendance vis-à-vis des combustibles fossiles importés, mais peut aussi réduire, en théorie, de 4 TWh soit 40 % des 10 TWh de besoins supplémentaires d'électricité en hiver (déficit) !

⁷ Puissance & Energie hivernales hydroélectriques du Complexe de Grande Dixence (CGD) : 2 TW & 1,5 TWh.

6.4 Aspects environnementaux et de cohabitations

La question environnementale émerge obligatoirement lorsqu'on envisage « d'immerger un corps étranger » dans un milieu aquatique tel qu'un lac ou même uniquement pour l'utilisation de son eau, par exemple afin énergétiques (impact thermique). Ceci quand bien même cela part d'une intension « pro nature ».

Dans les différents chapitres descriptifs du système ULISSE, les considérations environnementales et de cohabitations ont été intégrées à mesure de l'explication des choix technologiques et constructifs. Néanmoins, il peut être utile de les reprendre ici en les distinguant grossièrement en quatre catégories qui s'interfèrent et qui sont les suivants :

- Emplacement et dimensions de l'infrastructure immergée
- Genre et quantité des matériaux utilisés
- Interactions directes et indirectes avec le milieu aquatique
- Cohabitations avec les usagers du lac (navigation, pêche).

6.4.1 Emplacement

Les dimensions importantes d'un seul Réservoir type ULISSE (2 millions de m³ de volume et 54'000 m² de surface projetée et d'emprise sur le fond lacustre), nécessitent pour l'emplacement une profondeur idéale d'eau de 65 à 75 m. Ceci l'écarte d'office loin de la *beine lacustre*. Cette zone, qui s'étend de la grève vers le large forme une terrasse littorale immergée à faible pente. Dans le Léman elle abrite les herbiers qui se développent jusqu'à 10 m de profondeur environ et qui sont vitaux pour l'équilibre de l'ensemble de l'écosystème lacustre [60]. Les herbiers subissent déjà de nombreuses nuisances à leur développement d'origine humaine dont la destruction de jeunes pousses de macrophytes par les corps-morts et les chaînes de bateaux amarrés en pleine eau [56].

6.4.2 Genre et quantité des matériaux utilisés

Le Réservoir ULISSE est principalement constitué d'une enveloppe semi-rigide/souple et « autoportante » (sans structure portante). En dehors de câbles en acier inoxydable, l'enveloppe est composée d'une triple couche de textile en fibre de verre type E et pris en « sandwich » des pavés d'isolation thermique qui sont en verre cellulaire. Des bourrelets de feutre aiguilleté en fibre de verre ou de basalte sont intercalés entre lesdits pavés. L'ensemble est hydrophobe, inorganique, minéral et inerte vis-à-vis du milieu aquatique (§ 7.1).

L'ancrage du Réservoir ULISSE est réalisé par environ 500 ancres hélicoïdales visées dans le sol lacustre (§ 7.4). Ces ancres sont implantées dans le sol lacustre depuis un bateau, sans plongeur ni robot et n'ont quasi pas d'impact ou ne provoquent pas de perturbation du fond lacustre (Fig.6.1 ci-dessous).

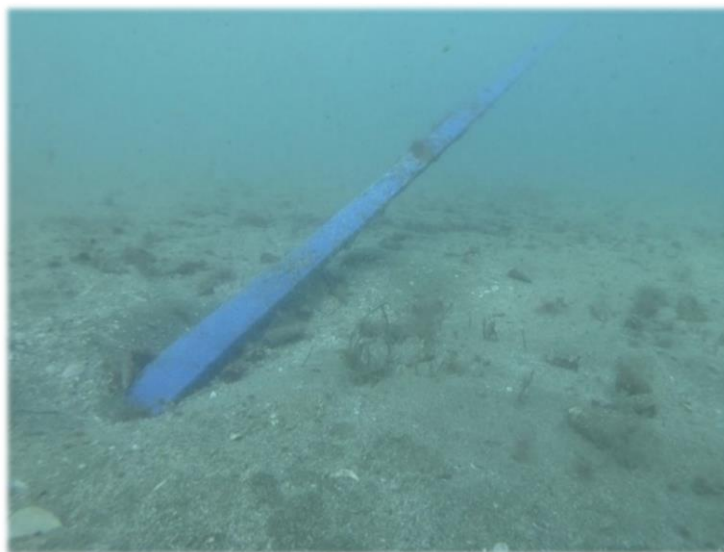


Fig. 6.1 : Impact d'un ancrage hélicoïdale visé dans le sol lacustre (Screw-in Anchor Technology, marinflex.com)

6.4.3 Interactions avec le lac

1. Dans la configuration où le **Réservoir ULISSE est chargé en été avec le retour de l'eau tempérée du réseau RTL**, on évite la dilution de rejets d'eau chaude de la climatisation directement dans le lac, ce qui en réduit l'impact négatif pour le lac, qui est déjà impacté par le réchauffement climatique. Le réchauffement climatique tend à modifier notamment le(s) cycle(s) saisonnier(s) de mélange et de stratification thermique des lacs, qui influencent leur oxygénation profonde qui est primordiale pour ces écosystèmes aquatiques [28, 29].

2. Dans la configuration où le **Réservoir ULISSE est chargé en été avec l'eau tempérée des couches supérieures du lac** (Épilimnion), le dispositif de captage sélectif (filtration du phytoplancton) permet de réguler si besoin les « blooms » (efflorescences algales toxiques) et de récupérer dans le Réservoir la production des GES et le CH₄ à usage énergétique (§ 7.3.4).

3. Les 621 millions de m³ d'eau confinés dans les 310 Réservoirs ULISSE constituent 39 PJ de chaleur et représentent une lame d'eau 30 cm d'épaisseur répartie sur les 2'024 km² des 15 grands lacs (§ 6.1).

L'extraction des 39 PJ de chaleur dans l'épilimnion abaisse la température de surface des lacs ce qui **réduit de 17 millions de m³ les pertes d'eau par évaporation** (chaleur latente de vaporisation de l'eau : 2,3 GJ/m³).

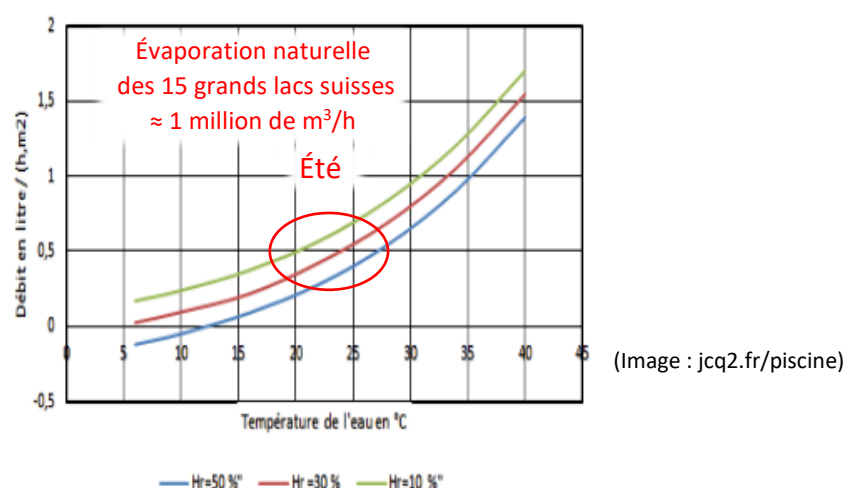


Figure 6.2 : Courbes d'évaporation d'un plan d'eau (litre/h.m²) en fonction de la température de l'eau (°C)

Si les 17 millions de m³ de pertes d'eau potentiellement évitées par les Réservoirs ULISSE peut sembler minime par rapport à l'évaporation naturelle des lacs (**≈ 1 M m³/h**), c'est néanmoins à mettre à l'actif d'ULISSE et c'est plus que les 14 millions de m³ d'eau évaporés (0.75 à 1 m³/s) et pris sur le Rhin en semestre d'été pour le refroidissement de la centrale nucléaire de Leibstadt ou les 10 millions de m³ de la centrale nucléaire de Gösgen pris sur l'Aar (§ 1.8.2).

D'autre part, l'abaissement de la température dans l'épilimnion et à la surface des lacs augmente la solubilité ou la teneur en oxygène dissous (O₂) dans l'eau, ce qui est favorable et indispensable à la vie aquatique (poissons).

Température de l'eau, (Celsius)	Concentration de l'oxygène, mg/L
0	14,6
5	12,8
10	11,3
15	10,1
20	9,1
25	8,5
30	7,6

Tableau 6.3 : Teneur en oxygène dissous dans l'eau en fonction de la température

De plus, une plus grande quantité d'oxygène est alors aussi transporté dans toute la colonne d'eau lacustre jusque dans le fond par l'effet de brassage induit par les Réservoirs ULISSE (§ 4).

4. Les courants de convections thermiques externes induits par les Réservoirs ULISSE peuvent améliorer la circulation des nutriments et l'oxygénation des couches d'eau du fond lacustre, protégeant ainsi l'écosystème aquatique contre l'eutrophisation et le réchauffement climatique (§ 7.3.2). Cette convection thermique est visualisée par la simulation numérique du Réservoir ULISSE réalisé à l'HEPIA (figure 6.4).

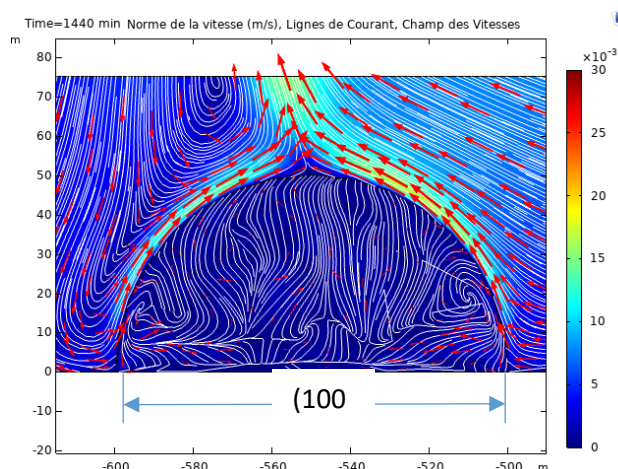


Fig. 6.4 : Visualisation de la convection thermique (champs de vitesse de l'eau) intérieure et extérieure du Réservoir ULISSE (coupe transversale de la simulation numérique COMSOL avec la modélisation du Réservoir à sa vraie grandeur dans le lac)

5. L'implantation de Réservoirs ULISSE, dans des zones homogènes du lac, peut constituer une diversification dans les « niches écologiques » et produire un enrichissement de la faune lacustre. En outre, la zone d'implantation des Réservoirs (à l'abri de la pêche) peut aussi constituer un espace protégé (zone de quiétude) où la faune peut se développer tranquillement, se reconstituer si besoin, et finalement déborder dans le reste du lac avec pour conséquence une augmentation de l'abondance et la biomasse de poissons. Ce phénomène est observé dans les Aires Marines Protégées, AMP [33, 34].

Extrait de l'article : <https://reporterre.net/Les-aires-marines-protégées-le-mirage-de-la-preservation-des-oceans> [34]
« Lorsqu'il y a une aire marine protégée, tous les petits bateaux de pêche se positionnent autour, car elles diffusent à l'extérieur », explique Jean-Pierre Gattuso. « Lorsque leurs niveaux de protection sont forts, elles ont des bénéfices à la fois pour les écosystèmes, mais également pour le tourisme, la pêche, la plongée sous-marine... Dans la plupart des cas, les usagers ne veulent plus s'en séparer », ajoute Joachim Claudet...

6. Le Réservoir ULISSE est soumis aux mouvements internes des masses d'eau lacustre, plus ou moins importants et qui peuvent menacer son intégrité structurale [61]. Son enveloppe semi-souple est légère et ne peut que se déformer sous l'action des déplacements d'eau. A minima, sous l'action des masses d'eau contraires (cisaillement horizontal), les déformations de l'enveloppe modifient le volume (ouvert) du Réservoir et en feraient perdre une partie de l'eau tempérée à l'intérieur. En aucun cas les contraintes sur les ancrages du Réservoir ne doivent dépasser leurs limites de maintien dans le sol lacustre (§ 7.4) !

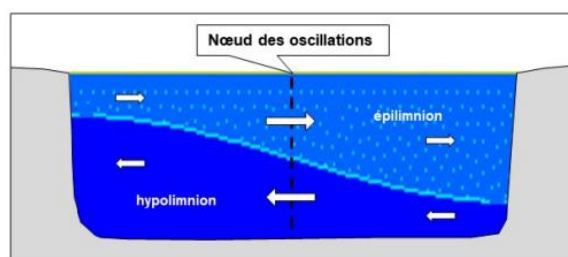


Figure 6.5 : Dû à la stratification thermique les courants engendrés par un épisode de seiche et seiche interne s'opposent entre l'épilimnion et hypolimnion. Les plus forts courants se créent sous le(s) nœud(s) d'oscillation. (Figure extraite du rapport d'analyse préliminaire sur les risques liés aux courants lacustres menaçant l'intégrité structurale d'ULISSE, Zsolt Vecsernyes, LHA de l'HEPIA 2022), **Annexe 4. [61]**

En conclusion, il est important d'étudier les phénomènes hydrodynamiques et de stabilité structurale d'ULISSE de manière appropriée par des spécialistes, dans un laboratoire d'hydraulique.

6.4.4 Cohabitations avec les usagers du lac (navigation, pêche)

*Paddle steamer boat « La Suisse »
Length 78 m (scale 1-1 / ULISSE)*

Submerged float
automatic cleaning robot
Antifouling paint-free
Protection cables against fish trolling lines

Maximum draft: 1.75 m
15 m
Epilimnion $\approx 20^{\circ}\text{C}$
Event
Emergency discharge valves!
Hyperbolic cross-section
 $R \approx 50\text{ m}$
 4000 m^2
Degassing valve
 $\approx 20^{\circ}\text{C}$
 $\approx 18^{\circ}\text{C}$
Winter
Extraction ($0,3\text{ m}^3/\text{s}$)
Summer loading of temperature water
"Hydraulic pantograph"
(Nutrients filtering)
Suction strainer ($1\text{ m}^3/\text{s}$)
Pumps
Flares beacon
Thermocline
ULISSE thermal convection
oxygenation of Hypolimnion
Hypolimnion $\approx 5^{\circ}\text{C}$

HDPE pipe (DN 500)
Triple-layer fiberglass textile cover
Thermal isolation 4 cm cellular glass
300 Stainless steel bending cables (86'000 m)
600 individual helical screw-in anchors of 12 t (Max. Archimedes thrust: 8'000 t)
Impact-free on lakebed!

À titre d'exemple, le tirant d'eau des grands bateaux de la CGN (Compagnie Générale de Navigation) du Léman est inférieur à 2 m. Les bateaux de plaisance (Voiliers) ont un tirant d'eau avec leur quille ne dépassant guère 1,2 m.



62

7 Réservoir ULISSE : constitution, fonctionnement et coût financier

7.1 Enveloppe du Réservoir

Le Réservoir subaquatique type ULISSE est principalement constitué d'une enveloppe semi-rigide formant une poche concave avec l'ouverture orientée vers le bas et fixée près du fond lacustre au moyen d'un ancrage ad hoc non invasif. Il se comporte comme une "montgolfière aquatique" remplie d'eau à une température supérieure et donc moins dense que le milieu aquatique environnant.

L'enveloppe du Réservoir est munie d'une isolation thermique constituée de pavés en verre cellulaire. Le verre cellulaire a une faible densité (100 à 200 kg/m³), résiste à une pression hydrostatique de 10 kg/cm² et est totalement hydrophobe. Outre le fait de réduire la déperdition thermique, ces pavés assurent, par leur faible densité vis-à-vis de l'eau, la stabilité structurelle indispensable du Réservoir autoportant même lorsque celui-ci ne contient que de l'eau froide identique à celle environnante du lac !

Illustré aux figures 7.1 et 7.2, la configuration en pavés rigides juxtaposés mais indépendants est requise pour donner la mobilité globale (semi-rigide/souple) et la forme de l'enveloppe du Réservoir. Les pavés suivent la courbure transversale de l'enveloppe ($R \approx 50$ m) et ont entre eux une inclinaison variable de quelques degrés.

La déperdition thermique du Réservoir est limitée (15-20 %), par le ratio favorable entre la surface de l'enveloppe hyperbolique ($88 \cdot 10^3$ m²) et l'important volume unitaire ($2 \cdot 10^6$ m³). L'épaisseur des pavés en verre cellulaire est limitée à quelque centimètres (5 à 10 cm) et peut varier selon la profondeur afin d'optimiser la quantité.

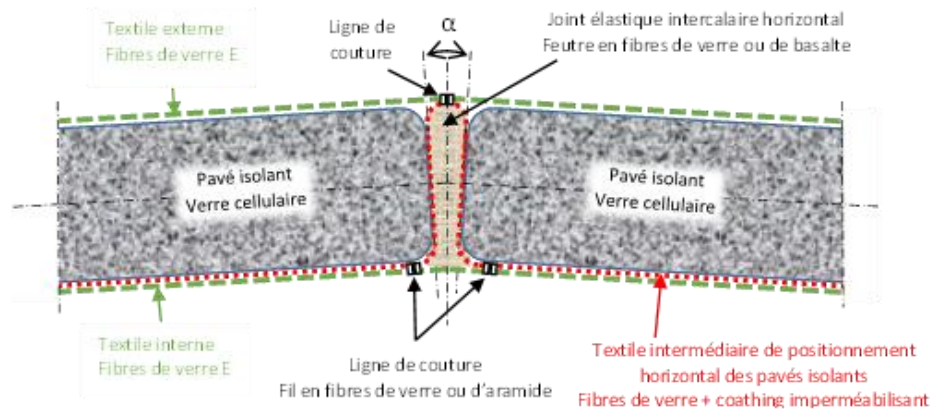


Figure 7.1 : Coupe transversale de l'enveloppe Réservoir type ULISSE (jonction des pavés isolants)

L'enveloppe est composée d'une triple couche de textile technique, en fibre de verre type E, qui est également hydrophobe, inorganique, minérale et inerte vis-à-vis du milieu aquatique. Les pavés d'isolation thermique sont pris en « sandwich » entre la couche externe de textile et la couche interne. Les pavés sont maintenus en place (contre la poussée ascensionnelle d'Archimède) par une couche de textile intermédiaire. Le textile intermédiaire de positionnement des pavés est solidarisé, avec le textile interne et/ou externe, au moyen de coutures (fils en fibre de verre ou d'aramide) formant ainsi une poche horizontale dans laquelle sont tenus en place les pavés.

Des bourrelets de feutre aiguilleté en fibre de verre ou de basalte sont intercalés entre lesdits pavés et autour comme couche anti-abrasion du verre cellulaire (§ 8.4.7, couche non représentée sur les figures 7.1 et 7.2). Ils réduisent aux interfaces la déperdition thermique ainsi que la fuite d'eau. Cette dernière est provoquée par la différence de pression hydrostatique de l'eau chaude sous l'enveloppe et peut être supprimée par une imperméabilisation du textile intermédiaire. En outre, les couches de textiles (perméables) sont plaquées contre les pavés et donc hydrauliquement obstruées par l'imperméabilité des pavés en verre cellulaire.

Les différentes sections de l'enveloppe du Réservoir sont disposées en larges bandes d'arches transversales qui sont reliées entre elles par serrage dans des *mâchoires de jonction* symétrique. Plus précisément illustré par la figure 7.2, au niveau des bords de ces bandes, les trois couches de textile entourent un câble en acier inoxydable qui ensembles sont serrées et maintenues dans lesdites mâchoires de jonction. Ces mâchoires ont la même longueur que la hauteur des pavés, de façon à pouvoir suivre la courbure de l'enveloppe. Pour en réduire le pont thermique, ces mâchoires de jonction sont recouvertes d'un matelas de feutres isolants.

Les bords inférieurs des bandes transversales de l'enveloppe adoptent également une forme hyperbolique par la tension d'un câble en acier inoxydable qui sont maintenus par un système similaire d'accrochage par mâchoire. Les câbles sont reliés aux ancrages en pieux visés à faible impact (type Marineflex Screw Anchor Technology).

La poussée ascendante d'Archimède, que doit au minimum retenir l'ancrage, totalise 7'000 t. Elle résulte, pour la moitié constante, de la densité apparente de l'isolant de l'enveloppe (-835 kg/m^3) et, pour la moitié variable, de la quantité ainsi que de la température de l'eau « chaude » dans le Réservoir ($-1,76 \text{ kg/m}^3 @ \Delta T : 15 \text{ K}$).

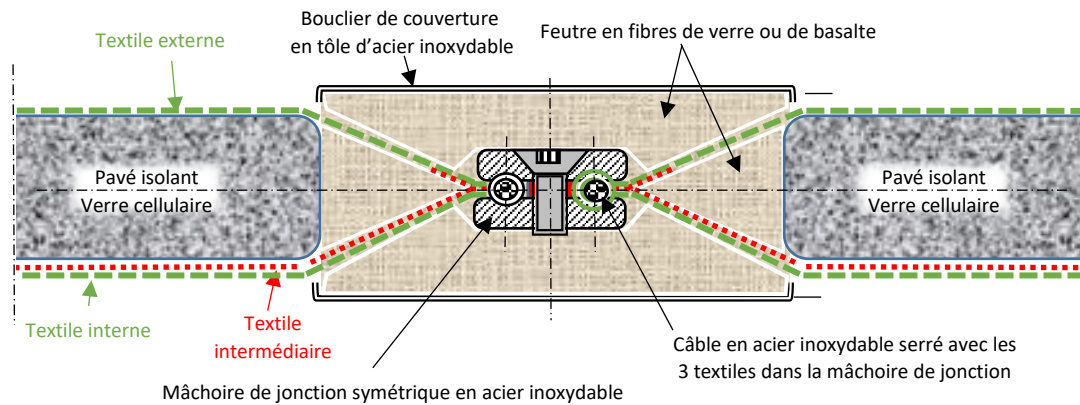


Figure 7.2 : Jonction des bandes transversales de l'enveloppe du Réservoir type ULISSE

7.2 Fonctionnement du Réservoir (cycle de chargement & déchargement)

Le fonctionnement du Réservoir consiste en un cycle annuel de 4 phases distinctes (saisonnières) de durées différentes et comprenant : 1 *Chargement Estival* d'eau tempérée (CE), 2 *Stagnation Automnale* du Réservoir plein (SA), 3 *Déchargement Hivernal* (DH) d'eau tempérée, 4 *Stagnation Printanière* (SP) du Réservoir « thermiquement vide ».

Les durées des différentes phases du fonctionnement annuel influencent le bilan énergétique et sont représentées à la figure 7.3 ci-dessous :

1. Chargement Estival (CE)	=>	2 mois (1/3 effectif : 6h/j)
2. Stagnation Automnale (SA)	=>	2 mois
3. Déchargement Hivernal (DH)	=>	6 mois
4. Stagnation Printanière (SP)	=>	2 mois

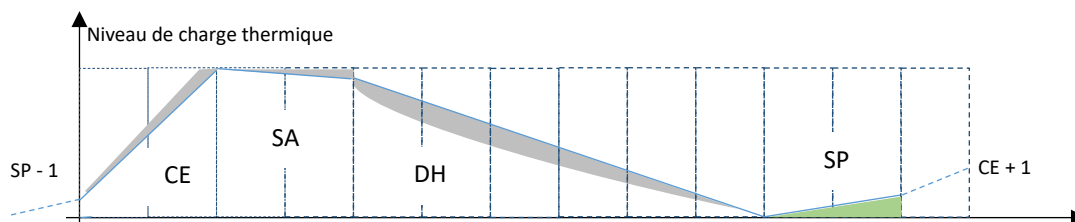


Figure 7.3 : Phases de fonctionnement dynamique du Réservoir ULISSE (cycle annuel)
(Zones grises : pertes / gain)

7.2.1 Processus du Chargement Estival (CE)

Le **Chargement Estival (CE)** est assuré par des pompes (à priori) électriques **lorsque l'ensoleillement et la production photovoltaïque sont maximum**. Pour charger les $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ d'un Réservoir type ULISSE, durant les 2 mois les plus chauds de l'été et à raison de 6 heures/jour (p.ex. de 10H à 16H) soit en 365 heures, **le débit de pompage est de $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$** .

Durant ce processus de chargement, chaque injection d'eau tempérée (à température T_e) au sommet du Réservoir (à volume constant) implique aussi l'évacuation d'un même volume d'eau froide à sa base (à température T_s). Avec un gain en température $\Delta T = 15\text{ K}$ sur la température initiale (T_i) de l'eau du Réservoir, l'énergie-chaleur injectée dans le Réservoir est alors de 125 TJ (@ $\Delta T = T_e - T_i = 15\text{ K}$).

L'idéal résiderait en l'absence de déperdition thermique, de convection et d'advection interne au Réservoir, avec l'établissement progressif d'une stratification thermique parfaite (sans dilution ou mélange entre eaux de températures différentes). Ceci reviendrait à la formation d'une « *thermocline à front plat* » à l'interface du volume - supérieur d'eau chaude et - inférieur d'eau froide à l'intérieur du Réservoir. Dans ce cas, la température de l'eau froide en sortie basse (T_s) serait constante et égale à celle initiale (T_i) jusqu'à la fin du chargement estival.

Toutefois, l'eau tempérée ($\Delta T = 15^\circ\text{K}$) injectée tend à se mélanger et se diluer partiellement avec l'eau froide déjà ou encore à l'intérieur du Réservoir ainsi qu'avec celle qui sort simultanément à sa base. En fonction du taux de dilution/mélange, il faudra donc injecter davantage d'eau tempérée que le volume réel du Réservoir pour le remplir complètement d'eau tempérée. Ceci à cause de l'advection ou les turbulences créées par les jets d'introduction d'eau ainsi que par la diffusion et la déperdition et la convection thermique.

Cet accroissement du volume d'eau tempérée peut être fourni par un débit et/ou un temps de pompage plus important. En fait la vitesse de remplissage thermique du Réservoir se fera de façon décroissante, à mesure que la température de l'eau (diluée) en sortie basse (T_s) augmente jusqu'à s'approcher et atteindre celle à l'entrée (T_e). En soit cela n'affecte pas la capacité thermique initiale ou nominale du Réservoir, pour autant que l'on compense par l'apport complémentaire d'eau tempérée durant la phase de chargement estival.

7.2.2 Processus de Déchargement Hivernal (DH)

La phase de Déchargement Hivernal (DH) concerne (ou est destiné à) la période de chauffage, qui est en moyenne de 193 jours à Genève (moyenne 1997-2007), soit 6 mois, dit aussi le « semestre d'hiver ou de chauffage ».

Le processus inverse à la phase CE tend également à se produire lors de la phase DH. En période hivernale ou de chauffage des immeubles, l'extraction d'eau tempérée du Réservoir est également compensée par une introduction d'eau froide à sa base et ceci avec le même phénomène de mélange et de diffusion entre l'eau tempérée et froide ; le tout induit par le trio délétère conduction-convection-advection.

7.2.3 Impact sur les débits et les performances d'ULISSE avec et sans CORSAIRE

Durant le DH, l'abaissement progressif de la température résiduelle ($\Delta T \approx 2\text{K}$) de l'eau du Réservoir implique que, pour une même puissance d'extraction de chaleur, il faudra augmenter le débit de pompage (dû à l'abaissement de la densité énergétique volumique de l'eau, en J/m^3). Outre une augmentation de l'énergie absorbée par les pompes de circulation d'eau dans le réseau de distribution (proportionnelle avec le carré du débit), la performance des Pompes à Chaleur (PAC) diminue à mesure que baisse la température de leur « source froide » (Réservoir ULISSE) et donc affecte négativement l'efficacité ou le coefficient de performance global du système.

Toutefois, contrairement au Chargement Estival ($1,5\text{ m}^3/\text{s} \times 365\text{ h}$), le Déchargement Hivernal du Réservoir est étalé sur le semestre d'hiver (6 mois). Pour une fourniture au RTL urbain, destiné aux besoins de chauffage et l'ECS des immeubles, le débit journalier (diurne et nocturne) est relativement continu mais évolue en fonction de la rigueur hivernale (température atmosphérique). Le débit journalier moyen du DH de déchargement thermique est alors d'environ $0,13\text{ m}^3/\text{s}$ ($\times 4'380\text{ h}$) soit $\approx 8,5\%$ du débit du CE.

Le débit de fourniture d'eau tempérée d'ULISSE, destiné au Déglaçage Hivernal du Réseau public d'eau potable (CORSAIRE externe au RTL), suit non seulement l'évolution (sinusoïdale) saisonnière initiale de la température du REP mais aussi la variation diurne/nocturne de la consommation d'eau potable. Pour simplifier, on peut considérer une modulation complète journalière, avec une concentration diurne de la consommation d'eau potable. Le débit (diurne) du DH d'ULISSE est alors de $0,25\text{ m}^3/\text{s}$ ($\times 2'190\text{ h}$), soit 17% du débit du CE.

L'apport continue ($4'380\text{ h}$) CORSAIRE interne au RTL (sans le REP urbain) reste lui identique au $0,13\text{ m}^3/\text{s}$.

Au final le débit d'extraction d'eau du Réservoir du DH, étant nettement moindre que celui pour le CE, produira proportionnellement moins de courants parasites d'advection et donc à priori un meilleur maintien de la stratification (*thermocline à front plat*) durant toute la phase du DH.

7.3 Captage d'eau tempérée et chargement/déchargement du réservoir ULISSE

7.3.1 Problématiques liminaires

Le Réservoir ULISSE est Chargé thermiquement en période Estivale (CE) de deux manières possibles ; l'une par le Captage sommital d'eau tempérée dans la couche supérieure lacustre (zone épilimnion) chauffée directement par le soleil d'été et l'autre par des rejets de chaleur issus du *Réseau Thermo Lacustre* (RTL) de climatisation (solaire indirecte) et de chauffage urbain (p. ex. GeniLac).

7.3.2 Eutrophisation lacustre

L'eutrophisation des milieux aquatiques (lacustre et marin) est caractérisée par une croissance excessive des plantes et des algues due à la forte disponibilité des nutriments et de conditions thermiques favorables. Outre l'apparition côtière des efflorescences algales (bloom), qui peuvent être nauséabondes et toxiques, le phytoplancton, qui se développe grâce à ces substances nutritives, absorbe de grandes quantités d'oxygène lorsqu'il meurt et se décompose. Sa prolifération provoque l'appauvrissement en oxygène nécessaire puis la mort par « asphyxie » de l'écosystème aquatique.

La problématique de l'eutrophisation aquatique, est due notamment par les apports excessifs d'azote et de phosphate, issus des nitrates de l'agriculture, des eaux usées et de la pollution automobile. La situation est exacerbée par l'ensoleillement, la température et le réchauffement climatique.

La limitation de cette eutrophisation aquatique passe d'une part par la limitation de ces apports nutritionnels (ex. avec l'interdiction de phosphate dans la lessive, limitation des engrais, etc.) et d'autre part par l'élimination fastidieuse des algues et plantes en question (ex. nettoyage des plages des marées vertes, etc.).

7.3.3 Encrassement et Colmatage des crépines d'aspiration d'eau lacustre

Généralement la prise d'eau pour des usages divers (eau potable, eau de refroidissement et/ou de chauffage hydrothermique lacustre) se situe près du fond (zone hypolimnion) pour bénéficier d'une température basse et plus stable que dans la partie supérieure du milieu aquatique (zone épilimnion).

Typiquement les crépines d'aspiration d'installations de pompage ont un maillage inférieur à 1 cm pour filtrer les débris et pour que les moules zébrées adultes ne puissent être aspirées (barrière efficace à leur prolifération dans le réseau). Les ouvertures de la crépine sont suffisamment grandes pour limiter la vitesse d'aspiration à un maximum d'une vingtaine cm/s pour que des petits poissons (< 1 cm) puissent s'échapper (NYSDEC, 1998) ⁸ [8]. Généralement une injection de chlore est réalisée afin d'empêcher le développement d'algues et de moules zébrées dans le réseau (source SIG, 2017).

Le nettoyage des crépines se fait généralement annuellement par jets d'eau sous pression, impliquant le recours à des plongeurs expérimentés et, à défaut, des manœuvres conséquentes de démontage et de relevage à l'air libre des crépines.

L'aspiration d'eau dans la partie supérieure du plan d'eau (épilimnion) en semestre d'été, précisément en pleine zone et période de croissance du phytoplancton (bloom), accélérerait normalement l'encrassement de la crépine d'aspiration et nécessiterait (sans autre dispositif prophylactique ou curatif) un nettoyage encore plus régulier et fastidieux voir rédhibitoire.

7.3.4 Captage des blooms phytoplanctoniques dans le Réservoir ULISSE

Le phytoplancton estival introduit dans le Réservoir de stockage ULISSE, privé de lumière vitale, meurt prématurément (par rapport à l'automne-hiver) et décante vers le fond où il est décomposé par les bactéries hétérotrophes, d'abord les aérobies qui consomment l'oxygène libre dans l'eau (O_2) en produisant du dioxyde de carbone (CO_2), puis dans le milieu devenu progressivement anoxique, les bactéries anaérobies en produisant principalement du gaz de méthane (CH_4).

Sous l'effet de la pression d'expansion, ces biogaz migrent vers le sommet du Réservoir et repousse l'eau par l'ouverture du bas hors du Réservoir, ce qui augmente la poussée d'Archimède et la force résultante de traction sur ses ancrages.

⁸ Thèse Viquerat P-A., page 66/ A/Pompage et rejet

Néanmoins, le Chargement Estival du Réservoir ULISSE offre l'opportunité de réguler la concentration de phytoplancton (par extraction ou filtration contrôlée au niveau de la crépine d'aspiration) afin prophylactique ou curative du milieu lacustre et par la suite de procéder au Captage in situ du CO₂ ainsi que du CH₄ afin énergétique.

7.3.5 Dispositif de captage d'eau en zone épilimnion tempérée et de stockage ULISSE

Représenté schématiquement par les figures 7.4/5/6 ci-dessous, le dispositif mobile de captage du Réservoir ULISSE est constitué d'au moins une Crépine d'aspiration, compartimentée en deux parties ou par paire de crépines séparées fonctionnant en tandem (A-B). La Crépine de forme tubulaire (1) est mobile et réglable en hauteur (3 à 15 m de la surface du lac) par les articulations (Xc, Xp) des conduits de liaison (2) aux motopompes (3-16). Ces dernières sont placées au sommet du Réservoir et raccordées à la Rampe d'injection/extraction d'eau tempérée, qui est aussi de forme tubulaire.

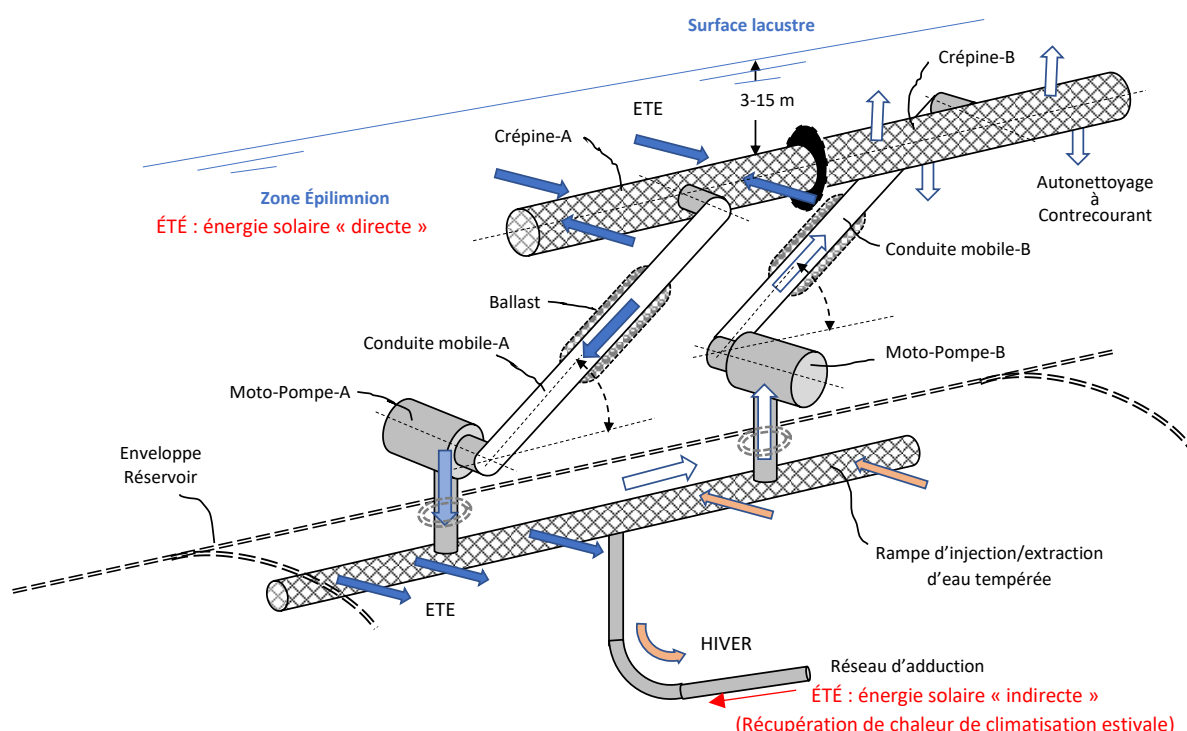


Figure 7.4 : Schéma de principe du dispositif mobile de captage d'eau tempérée lacustre (zone Épilimnion) Ici la rampe de d'injection/extraction interne étant fermée lors du processus d'autonettoyage de la crépine. L'eau aspirée dans la crépine-A est refoulée vers la -B pour le décolmatage à contre-courant et vice-versa.

Chaque partie A/B ou paire de crépines est munie d'une Grille de distanciation (G) et d'un Filtre (F) à micro-organismes (phytoplancton). Les filtres (F) sont escamotables par télécommande, soit par translation soit par rotation (à 90°) autour de l'axe longitudinal de la Crépine tubulaire (Fig. 3). Ceci permet de placer au besoin les filtres devant les orifices d'aspiration et ainsi de réguler la quantité de phytoplancton captée par unité de volume d'eau aspirée. L'actionneur télécommandé, par exemple de type vérin ou autre, n'est pas représenté pour ne pas surcharger inutilement le dessin.

Les conduits articulés 2-A/B forment un parallélogramme déformable (géométrie variable), tel un « pantographe hydraulique » qui maintient la crépine mobile dans une position horizontale quelle que soit sa hauteur (h) vis-à-vis du plan d'eau lacustre. L'inclinaison des conduits de liaison place la crépine d'une position basse (h-b), en passant par la zone de captage optimal d'hauteur (h-m, de 3 à 5 m), à une position haute (h-h) qui permet de sortir la crépine hors de l'eau pour son entretien à l'air libre.

Le sommet du Réservoir, situé à une profondeur d'une dizaine de mètres, est hors de portée (tirant d'eau) des bateaux qui peuvent sans autre passer par-dessus. Les conduits de liaison ont dès lors une longueur minimum de 10 m pour permettre à la crépine de sortir de l'eau en position haute.

La rampe d'injection/extraction d'eau est munie d'un obturateur tubulaire des orifices latéraux par translation ou rotation télécommandée. Ceci permet d'envoyer alternativement de l'eau d'une pompe vers l'autre compartiment de la crépine mise à l'arrêt pour son autonettoyage périodique à contre-courant et éventuellement complétée d'une injection d'air comprimé de décolmatage. La pompe qui est à l'arrêt présente alors qu'une faible perte de charge au contre-courant d'eau qui la traverse.

Un système de désinfection par UV-C peut être installé à l'intérieur de la crépine d'aspiration et de la rampe de distribution dans le Réservoir. Ceci permet de réduire la colonisation de moules dans les conduits et de prétraiter l'eau en vue d'une utilisation dans le réseau d'eau potable (REP).

Représenté plus en détails à la figure 7.5 ci-dessous, l'action de positionnement de la hauteur (h-h) de la crépine d'aspiration peut être réalisée à l'aide d'un réservoir-ballast piloté (18) qui fournit une poussée ascendante modulable sur le dispositif.

Ce réservoir-ballast peut être fixé directement sous la crépine d'aspiration (1) ou à toutes autres parties mobiles (2), qui en assureraient l'action de positionnement. Le pilotage de la poussée du réservoir-ballast (18) est assuré par la variation du ratio des volumes à l'intérieur d'eau et d'air comprimé alimenté de l'extérieur (20).

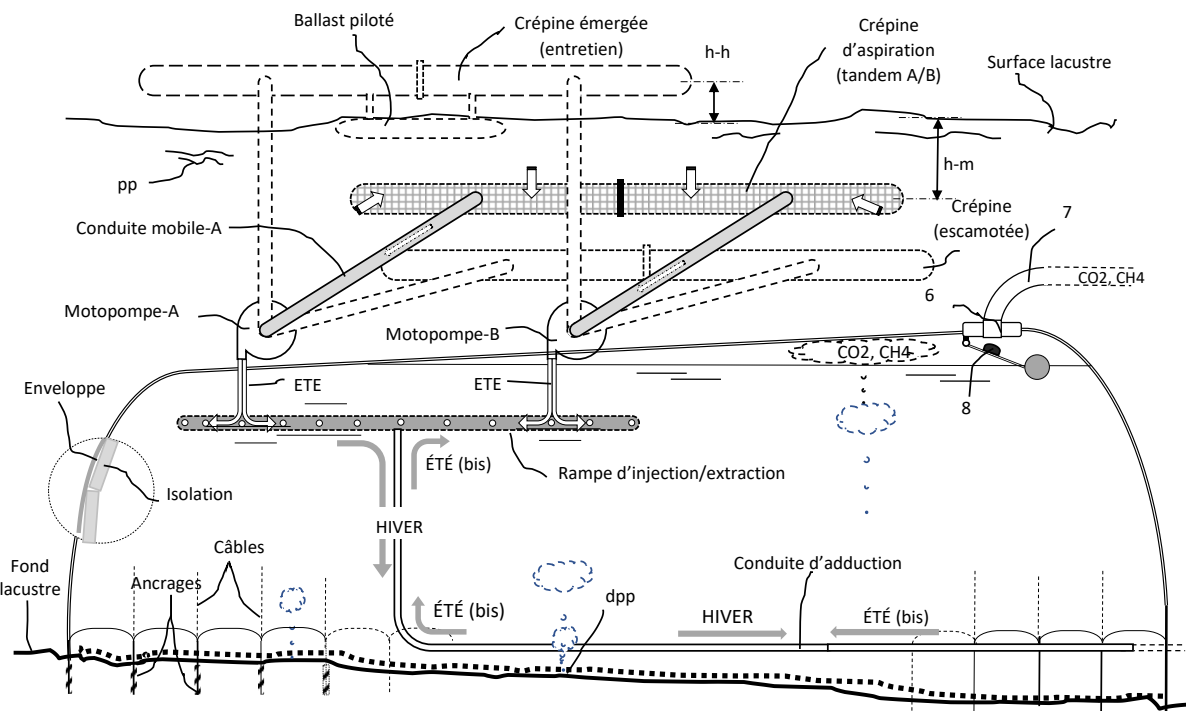


Figure 7.5 : Schéma général du système de Chargement Estival et du Déchargement Hivernal du Réservoir ULISSE

Une alternative ou une aide complémentaire à ce réservoir-ballast (18) de positionnement est par exemple un vérin pneumatique (19) dont l'intensité de la force d'action de levage est produite par la pression de l'air comprimé (20) sur le piston intérieur du vérin.

Cette solution n'influe que peu sur le poids apparent de la partie mobile et évite éventuellement la nécessité d'un système de blocage du positionnement. La pression de l'air dans le vérin (19) détermine la force du piston à l'équilibre avec celle de réaction due au poids du mobile en fonction de sa position. Un contre-poids déporté ou un ressort de rappel peut éventuellement compléter le mécanisme en question.

7.3.6 Alimentation d'énergie des groupes motopompes

Les moteurs (16) des pompes (3) sont électriques ou pneumatiques (à air comprimé) et sont alimentés par une source génératrice correspondante terrestre distante (17). Les groupes motopompes sont immergés et placés sur le dôme du Réservoir par l'intermédiaire d'un cadre de fixation (23) répartissant la charge de l'ensemble et sont munis selon les besoins de sustentateurs à faible densité, p.ex. en verre cellulaire.

De plus, ces groupes motopompe sont logés dans une enceinte étanche (21) et pressurisée à l'air comprimé pour repousser l'introduction parasite d'eau (22). Dans le cas d'un moteur électrique, le refroidissement par l'évacuation de la chaleur en dehors de l'enceinte est encore facilité par la densité supérieure de l'air comprimé de pressurisation. L'enceinte (16), remplie d'air pressurisé (22), procure une poussée d'Archimède complémentaire qui réduit encore le poids des groupes motopompes sur le dôme du Réservoir ULISSE.

Pour équilibrer les forces de torsions sur les articulations, les conduits de liaison (2) avec les motopompes (16-3) sont montés de part et d'autre des côtés de la Crépine (1). Les groupes motopompes peuvent aussi être montés co-axialement, ce qui nécessite alors un coude à 90° sur leur entrée d'aspiration pour relier l'articulation inférieure (Xp) des conduits de liaison (2).

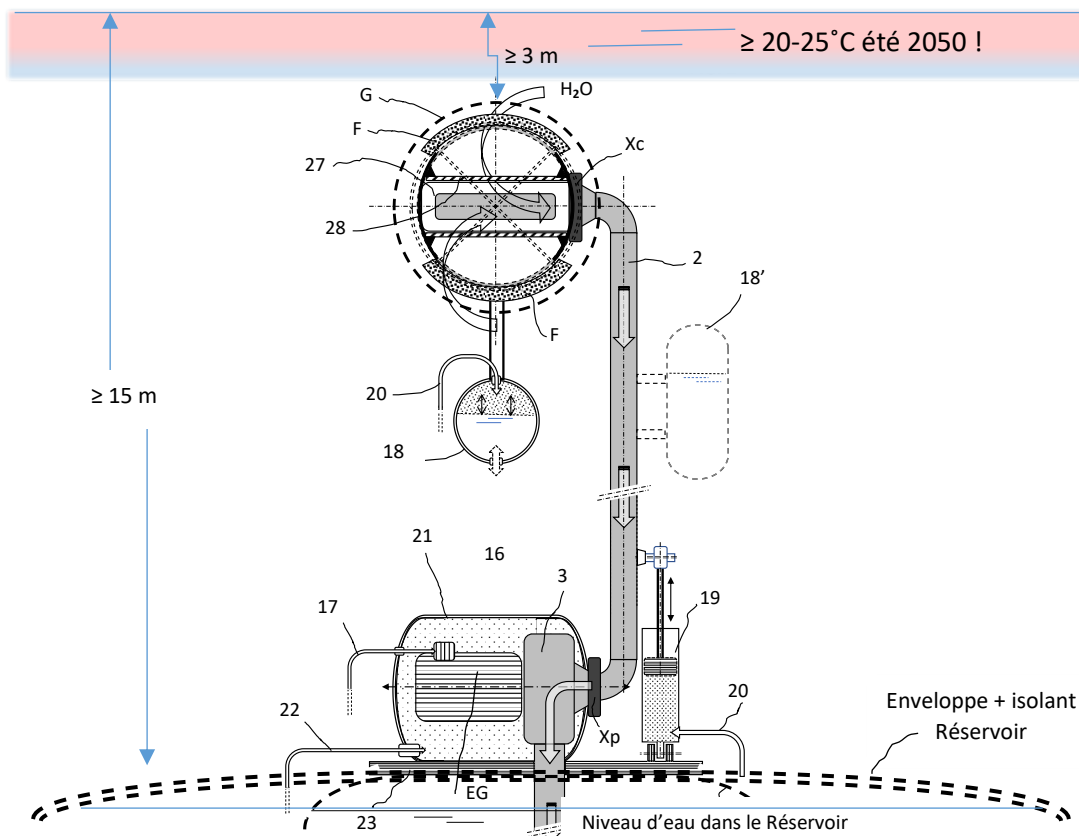


Figure 7.6 : Représentation schématique du Groupe motopompe de la Crépine d'aspiration d'eau

7.3.7 Obturateurs hydrauliques et clapets de dégazage

Un dispositif obturateur rotatif (27), fixé transversalement dans la crépine au niveau des articulations Xc, vient couvrir l'ouverture (28) dans le tube de passage de l'eau lorsque la crépine descend dans sa position basse ou de repos (Figures 7.4 et 7.5), ce qui évite une remontée d'eau indésirable vers la crépine venant du Réservoir. L'obturateur rotatif (27-28) étant fixé à la crépine et le tube étant fixé co-axialement au coude supérieur du conduit de liaison 2, ensemble ils forment le palier rotatif de l'articulation Xc.

Si nécessaire, un frein ou un cran d'arrêt entre les deux tubes obturateurs permet un verrouillage télécommandé de l'articulation et donc de la position en hauteur de la crépine.

La courbure du sommet du Réservoir associée à son inclinaison longitudinale et le contrôle de l'orifice d'extraction (6) au point le plus haut du Réservoir créent un Espace de Dégazage (ED) où migre naturellement le biogaz (CO₂, CH₄, thiols) qui est produit lors de la décomposition par les bactéries du phytoplancton mort dpp privé de lumière dans le Réservoir.

Le niveau d'eau ΔR dans le Réservoir et donc le volume de l'Espace de Dégazage (ED) sont conditionnés par la pression Pg du biogaz à l'intérieur. Cette pression Pg est contrôlée par un régulateur de pression et correspond

principalement à la pression hydrostatique de la colonne d'eau ($P_h = \rho \cdot g \cdot \Delta h$) avec la surface du plan d'eau et additionnée de la pression d'Archimède P_A .

Par exemple, avec un sommet du Réservoir à 10 mètres sous la surface lacustre, la *pression hydrostatique* (P_h) y est de 1 kg/cm² ou 1 bar. À cette profondeur sur l'enveloppe, la pression d'Archimède différentielle ($\Delta P_A = \Delta \rho \cdot g \cdot h$) résulte de l'écart de densité ($\Delta \rho$) de la hauteur (h) de colonne d'eau dans le Réservoir et celle du lac environnant. Elle est induite par l'écart de température intérieure-extérieure (ΔT_{i-e}). Par exemple, avec $\Delta T_{i-e} = 15K$, $\Delta \rho = 1.8 \text{ kg/m}^3$, et $h = 50 \text{ m} \Rightarrow P_A = \Delta \rho \cdot g \cdot h \approx 9 \text{ g/cm}^2 \approx 9 \text{ mbar}$, soit de l'ordre du centième de P_h .

L'orifice (6) est muni d'une vanne d'obturation à flotteur (8) qui maintient un minimum d'Espace de Dégazage (ED) et empêche aussi l'eau de s'introduire dans le conduit (7) du réseau de récupération et de transport des biogaz ; ceci à titre « prophylactique » (GES) et à usage énergétique.

Un clapet de dégazage de sécurité (10) muni d'un flotteur (11), situé à une hauteur inférieure E_{max} , limite le volume maximum de l'espace de dégazage (ED). Ceci pour limiter la poussée d'Archimède sur le Réservoir. À mesure que le volume de l'espace de dégazage augmente, une partie des pavés d'isolation au sommet n'est plus immergée et ne subit donc plus de poussée d'Archimède. Toutefois ceci est négligeable par rapport à celle de l'espace de dégazage (ED).

7.3.8 Répartition du système de captage des Réservoirs ULISSE

Compte tenu d'un volume unitaire de $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ du Réservoir type ULISSE et un Chargement Estival (CE) concentré sur 365 heures (6 h/j x 2 mois), le débit de pompage correspondant est d'environ $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Le Réservoir type ULISSE peut être équipé de plusieurs Crépines d'aspiration mobiles, à double compartiments et groupes motopompes. Avec une longueur totale du Réservoir type de 560 m et un espacement de 100 m on peut installer et répartir 5 Crépines « doubles » soit 10 groupes motopompes. Chaque motopompe (16-3), avec sa conduite de liaison (2) et sa demi-crépine (1), a alors un débit de $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$. Les pertes de charges restent relativement réduites.

L'important volume total de stockage du dispositif ULISSE est constitué de plusieurs Réservoirs subaquatiques disposés en réseau (12 M m^3 , réparties en 6 réservoirs pour le réseau RTL GeniLac).

L'extraction hivernale d'eau des réservoirs d'ULISSE se fait par les crépines tubulaires intérieures (Rampes d'injection/extraction) qui sont alors en mode aspiration depuis la Station de Pompage Lacustre (SPL). Les pompes d'aspiration-injection, sur le dôme du Réservoir, sont alors au repos et leur orifice d'entrée d'eau respectif fermé par la rotation des conduits articulés du pantographe hydraulique (Figures 7.4/5/6).

L'eau est transportée via une conduite d'adduction en Polyéthylène Haute Densité (PEHD) pourvue d'une isolation thermique intégrée (Figures 5.16/17).

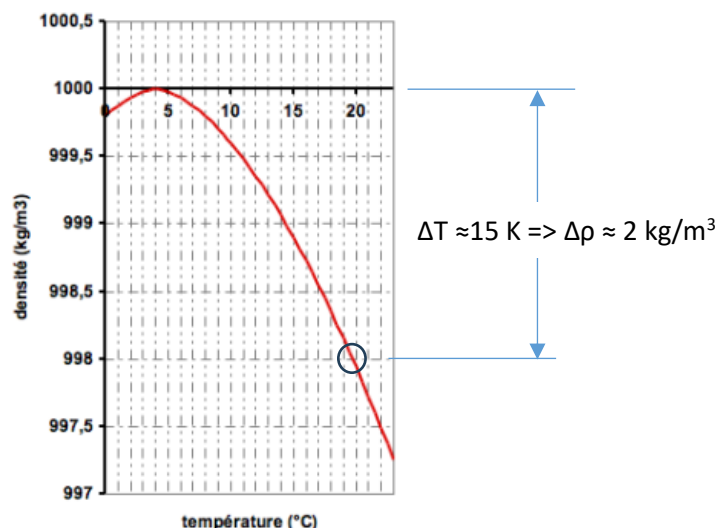


Figure 7.7 : Variations de densité de l'eau douce avec la température à la pression atmosphérique, calculées par la formule empirique suivante : $\rho = (1 - 1.9549 \cdot 10^{-5} \cdot |T - 4| \cdot 1.68) \cdot 1000$ [Hostetler (1990), Heggen (1983)]. Source : Modélisation des températures de surface et de fond des plans d'eau, Camille Bouchez, 09.2010

7.4 Ancrage du Réservoir type ULISSE

Le Réservoir type ULISSE subit une traction ascendante d'Archimède qui culmine à 7'000 t (éq.8.39), dont 3'500 t par l'isolation (4'400 m³ de verre cellulaire, $\Delta\rho_v = -835 \text{ kg/m}^3$) et 3'500 t variables en fonction de la différence de température de l'eau stockée (2 M m³, $\Delta\rho_e = -1,76 \text{ kg/m}^3$ @ $\Delta T_e = 15 \text{ K}$). L'ancrage du Réservoir est réalisé au moyen de **515 ancrages hélicoïdales vissés dans le sol lacustre, réparties sur 103 Carrés de jonctions** et par des câbles reliés sur la circonférence de 1'234 m (éq.8.34) de la base de l'enveloppe du Réservoir.

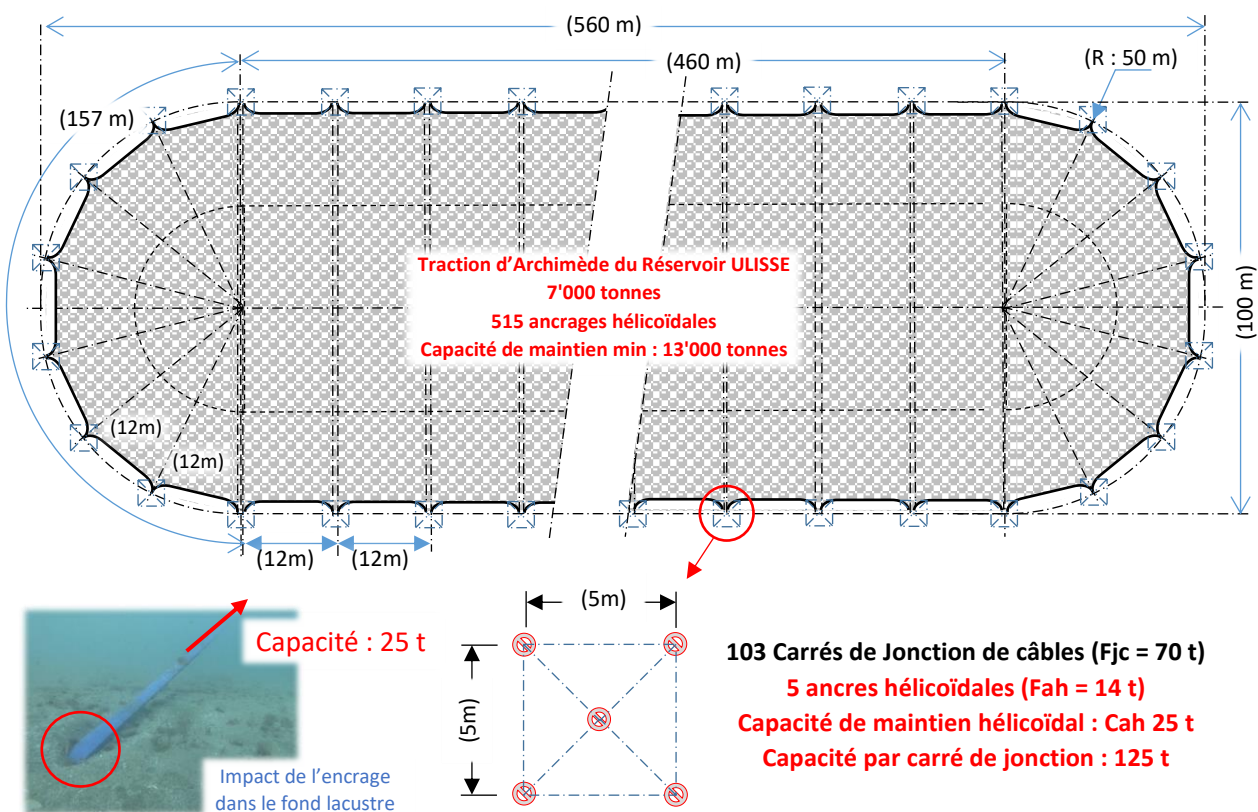
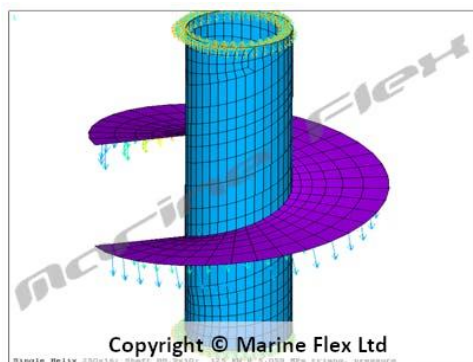


Fig. 7.7 bis : Principe de l'ancrage du Réservoir type ULISSE sur le fond lacustre avec ancrs à vis hélicoïdales Marine Flex

Les bords inférieurs des bandes transversales de l'enveloppe adoptent également une forme hyperbolique par la tension d'un câble en acier inoxydable qui est maintenu par un système similaire d'accrochage par mâchoire. Cette partie inférieure de l'enveloppe est couverte d'une jupe de textile en fibre de verre, à priori non isolée, touchant le fond lacustre et fermant l'accès au Réservoir à la faune local (poissons, etc.).



Figures 7.8 : Ancrage hélicoïdal pour fond lacustre et marin : Screw-in Anchor Technology (marinflex.com)

Les ancrs hélicoïdales (Marine Flex, fig. 7.8) sont caractérisées par une très haute capacité de maintien verticale jusqu'à 25 t (charge de rupture testée). Elles n'ont quasi pas d'impact ou de perturbation du fond lacustre. Elles

7.4.1 Mise en œuvre des ancres hélicoïdales Marine Flex (40 ans d'expériences)

Système de portique à compensation de mouvement : une productivité plus élevée est obtenue car le système permet de travailler dans des conditions moins clémentes sans lesquelles un navire/une plate-forme de travail devrait cesser ses activités (fig. 7.9). Coût sous licence de l'équipement d'installation sur le navire \approx 350'000 CHF.



Figure 7.9 : Navire d'installation depuis la surface (sans plongeur ni robot) avec portique à compensation de mouvement

	Anchor Weight (Kg)	Holding Capacity (T)
Marine Flex / N-Viro	75	12.5
Aqualine Fluke Anchor	700	14
Concrete block	5000	2.9

Tableau 7.10 : Comparaison de forces d'encrages en bloc de béton et vis hélicoïdal Marine Flex

Testé empiriquement jusqu'à la destruction : tous les composants d'ancrage conçus sont adaptés à la fois structurellement et géo-techniquement et sont testés empiriquement avec des tests destructifs. Le tube utilisé est de qualité spécifique pour faciliter l'installation tout en atténuant le risque de sur-couple ou de défaillance de durcissement à froid lors de l'installation.

Ancre sans arbre : les ancrs sans arbre sont à la pointe de l'efficacité en charge avec un rapport poids/capacité de charge incomparable (tableau 7.10).

Système d'ancrage à plaque en option : permet l'installation dans des sites très difficiles où la configuration de l'hélice d'ancrage peut être rapidement ajustée pour faire face à des substrats très variables.

Ancre à vis pour arbre de tarière hélicoïdale : le système d'ancrage à plaque en option Helix (HOPAS) construit avec des arbres d'ancrage tubulaires de haute qualité permet une installation dans des conditions de sol difficiles telles que la pénétration de substrats très durs et la transition de substrats très mous à durs.

Hélice de forme : toutes les ancrs sont construites à l'aide de véritables plaques d'hélice de forme, ce qui garantit l'intégrité de la soudure, permet d'optimiser la profondeur de pas par tour d'installation (critique pour les performances de l'installation), la capacité de maintien de l'ancre et la signature.

Sur la base des premières données reçues de l'entreprise Marine Flex Ltd (Nouvelle Zélande !), le coût d'installation des 515 ancrs hélicoïdales Marine Flex pour un Réservoir type ULISSE pourrait être de 1 à 1,5 M CHF, y compris l'équipement d'installation dont le portique pour le navire (350'000 €, sous licence). Durée des travaux 51 jours (10 ancrs/j).

7.5 Robot nettoyeur de l'enveloppe du Réservoir type ULISSE

Toutes surfaces immergées dans l'eau et même à l'air sont immédiatement colonisées par des organismes vivants. C'est le cas notamment pour les coques des bateaux (Fooling). Des algues et des moules vont s'incruster et à terme tapisser toute la surface, au point d'augmenter la trainée voire de menacer la flottabilité.

Les algues ont besoin de lumière et n'iront pas coloniser des surfaces dans l'obscurité. Par contre les moules le feront progressivement dont la moule zébrée et la moule quagga extrêmement invasive depuis 2015 dans les lacs suisses. Cette dernière supprime la Zébrée et s'étant dans des plus grandes profondeurs. Les conduites et crépines d'aspiration des stations de pompage sont également envahies par ces moules.

L'enveloppe du Réservoirs ULISSE ne devrait pas échapper au phénomène ($2 \times 90'000 \text{ m}^2$, externe/interne, par Réservoir). Étant donné que la moule Quagga semble ne pas aimer les éléments en mouvement ou un fort courant d'eau [...], le nettoyage régulier de l'enveloppe pourrait être fait automatiquement par des robots/drones nettoyeur sous-marin ou ROV (Remotely Operated Vehicle). Le ROV, de nettoyage et d'inspection de carènes, est relié à un câble « ombilical » qui sert à la télécommande et le retour visuel.



Figures 7.11 : Exemple de Drone nettoyeur sous-marin, Keelcrab

L'exemple du drone Keelcrab (Fig. 7.11 ci-dessus) se distingue par son exosquelette en plastique doté d'une balance hydrostatique neutre. La force d'aspiration est générée par une pompe centrale ou turbine (hélice), entraînée par un moteur électrique, qui réalise la double fonction de maintenir le drone contre la coque et d'enlever les algues formées. Le mouvement est dirigé par des brosses en caoutchouc sur rails permettant des déplacements dans toutes les directions. Afin d'améliorer l'efficacité de l'élimination de la végétation, des brosses à poils en nylon de différentes longueurs et différents diamètres ont été installées. La caméra sous-marine IP68 haute résolution permet de diriger le robot via une télécommande filaire avec affichage vidéo en temps réel. En Suisse une équipe de l'EPFZ développe des robots sous-marin ou lacustre avec le **projet Téthys Robotics [62]**. Il serait opportun de développer avec eux une version autonome dédiée au nettoyage et inspection des Réservoirs ULISSE.

7.6 Coût d'investissement financier du/des réservoir(s) ULISSE

7.6.1 Comparatif avec des grands systèmes de stockage hydrothermique

Au stade de cette étude exploratoire du projet ULISSE, il est difficile d'établir l'investissement financier nécessaire pour la réalisation d'un Réservoir totalement inédit, et qui plus est de plusieurs réseaux entiers avec près de 300 Réservoirs type ULISSE implantés dans les 15 grands lacs suisses. Au mieux, sur la base des dimensions du Réservoir type et l'inventaire des principaux matériaux constitutifs, on peut dégager sous réserve un ordre de grandeur du coût « matériel » mais plus difficilement celui de la fabrication et de la mise en place sur site (fond lacustre). Le coût de la phase d'étude approfondie pluridisciplinaire et de la réalisation d'un prototype pilote est également prématuré à établir dans la présente étude exploratoire.

Néanmoins, l'analyse des plus grandes réalisations dans le domaine du stockage d'énergie-chaleur solaire permet d'esquisser une première idée de l'investissement financier potentiellement nécessaire.

La différence de prix entre un prototype ou une Formule 1 et une voiture de série est essentiellement due au nombre d'unités et le mode de production. Ceci est valable pour à peu près pour tout objets fabriqués. En ce qui concerne les grands ouvrages (à priori en plus petit nombre), c'est aussi et surtout une question de taille ou de dimensions (*économie d'échelle par la Taille*) qui va déterminer le coût unitaire et volumique.

En l'occurrence, pour les différents systèmes de stockage hydraulique d'énergie-chaleur, la taille (volume, m^3) a un effet inversement « logarithmique » sur le coût de construction (CHF/m^3) ; ceci toutefois indépendamment de la capacité thermique unitaire (MJ/m^3), qui elle dépend de l'excursion (variation utile) de la température de l'eau stockée (voire sous pression). Les dimensions géométriques déterminent principalement la quantité des différents matériaux à mettre en œuvre mais aussi l'emprise spatiale de l'ouvrage.

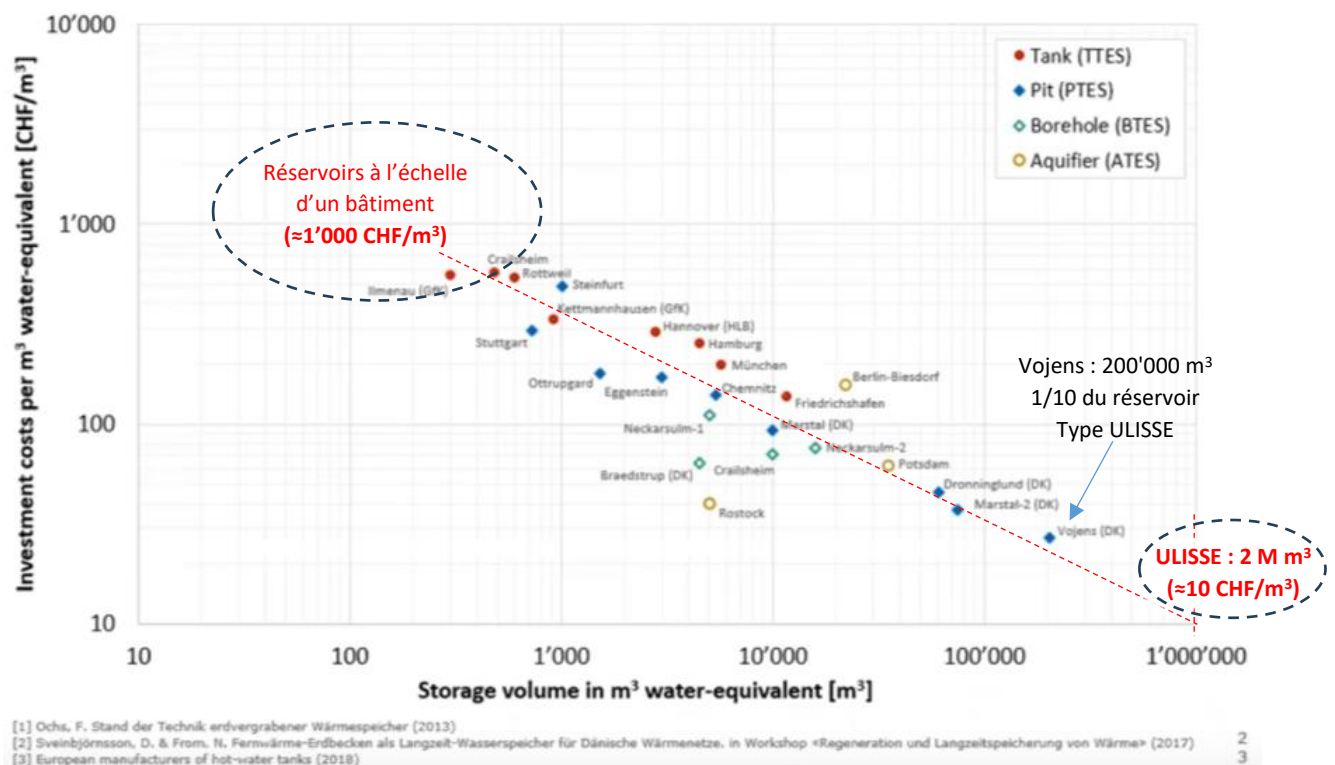


Figure 7.12 : Coût d'investissement des différents types de stockage d'eau chaude (source : HSLU Hochschule Luzern).

On observe l'effet de la taille (économie d'échelle) avec une régression linéaire qui tend vers $10 CHF/m^3$ @ $1 M m^3$

Sur le graphique de la fig. 7.12 ci-dessus on remarque une large distribution (facteur 100) du coût (CHF/m^3) en fonction du type de stockage (Tank, Pit, Borehole, Aquifer) et en fonction du volume « équivalent-eau ». Chaque type de stockage a son domaine de tailles de réalisations effectives. Les bassins couverts (pit) couvrent toute la plage.

Par exemple, les réservoirs hors sol (*Tank*) couvrent classiquement des volumes entre 200 et 10'000 m³, avec des coûts d'investissement respectifs relativement élevés, entre 650 et 150 CHF/m³. Les bassins enterrés/couverts et les puits (*Pit & Borehole*) couvrent une plus large plage par le nombre de réalisations et par le ratio volume & coût (700 m³, 500 CHF/m³ et 200'000 m³ @ 24 CHF/m³ pour le plus grand stockage à Vojens au Danemark).

Les bassins ou fosses de stockage ont une importante emprise au sol (surface perdue pour d'autres usages) et nécessitent de gros volumes d'excavation (fig. ci-dessous) mais pas seulement. L'imperméabilisation du bassin (liner) à l'aide de PEHD limite la température de chargement à maximum 90°C et a une durée de vie en est limitée. Leurs **pertes thermiques vs l'énergie déchargée sont comprises entre 9 et 24 %** pour les installations commerciales (14 % pour le bassin de stockage de Vojens contre 16 % pour un Réservoir ULISSE). => § 10.6

Le stockage en Aquifère a moins de réalisations (3) notamment dû à la problématique de la maîtrise de la perte thermique par la circulation naturelle de l'eau dans le sous-sol. Le volume et le coût volumique du stockage en Aquifère sont respectivement de quelques dizaines de milliers de m³ et d'environ 100 CHF/m³. De plus, la température peut également poser des problèmes et des restrictions sanitaires pour les nappes aquifères lorsqu'elles sont destinées à l'alimentation (eau potable).

Les puits secs (*Borhole*) n'ont pas de volume d'excavation ni d'isolation apportée mais peuvent aussi être impactés par la migration d'eau « parasite ». La performance thermique des puits est influencée par la puissance de soutirage ainsi que par la proximité de puits voisins (*Syndrome des McDo*, par la densité avec l'expansion).

Ce qui influence le coût des systèmes de Stockage Hydro-Thermiques (SHT) est la structure du contenant (dont le volume d'excavation/remblais, parois/liner, etc.) ainsi que l'isolation thermique. L'épaisseur et l'efficacité de l'isolation apportée au réservoir et au bassin enterré (parois, couverture flottante d'isolation) sont fortement tributaires du rapport surface/volume et favorables aux grands réservoirs.

D'une manière générale, on remarque sur le graphique 7.12 que les différentes réalisations de stockage de chaleur sont distribuées globalement selon une diagonale par régression linéaire (abscisse logarithmique). Cela montre une tendance baissière (coût volumique vs taille) orientée vers le coin inférieur droit du graphique (10 CHF/m³ pour 10⁶ m³). Ainsi un dispositif de stockage hydraulique de chaleur sensible de 2 M m³ équivalent-eau représenterait un coût unitaire d'investissement de l'ordre de 20 M CHF (équivalent au Réservoir type ULISSE).

7.6.2 Emprise de terrain du champ de capteurs thermiques et du bassin de stockage

Les dispositifs de stockage saisonnier sont généralement associés à un champ de capteurs solaires thermiques et un réseau de distribution de chaleur avec pompes à chaleur raccordés aux immeubles. Ces champs de capteurs solaires thermiques ont également une importante emprise au sol (dont achat et mobilisation de terrain).



Figure 7.13 : Champs de capteurs solaires thermiques pour le chauffage urbain de Vojens, Danemark, (70'000 m²) à côté du bassin de stockage saisonnier (210'000 m³) en construction en 2014-15 (encore sans la couverture isolante et flottante) (source : <http://solarheateurope.eu/2020/05/19/vojens-district-heating/>)

Par exemple (Figure 7.14), le plus grand système au Monde de stockage de chaleur avec capteurs solaires thermiques pour le chauffage urbain est celui de l'agglomération de Vojens (DK). Il couvre une surface terrestre de 144'000 m² soit cinq (5) fois celle du seul réservoir de stockage saisonnier de chaleur (27'000 m²) !

A titre de comparaison, l'emprise projetée sur le fond lacustre par unité d'énergie stockée (m²/TJ) d'un Réservoir type ULISSE est donc près de huit fois (7,6) inférieur au plus grand système de stockage saisonnier terrestre de chaleur solaire (Vojens).

La densité énergétique (MJ/m³) d'ULISSE est certes moindre (1/3) du fait qu'il fonctionne avec une excursion thermique moindre (ΔT plein-vide = 15 K pour ULISSE contre 50 K pour le bassin de Vojens). Néanmoins, le système ULISSE n'a pas besoin de terrain pour capter l'énergie-chaleur solaire puisqu'il la puise directement dans le lac, soit il est chargé par des eaux de rejets de chaleur industriels ou de climatisation (\Rightarrow les RTL).

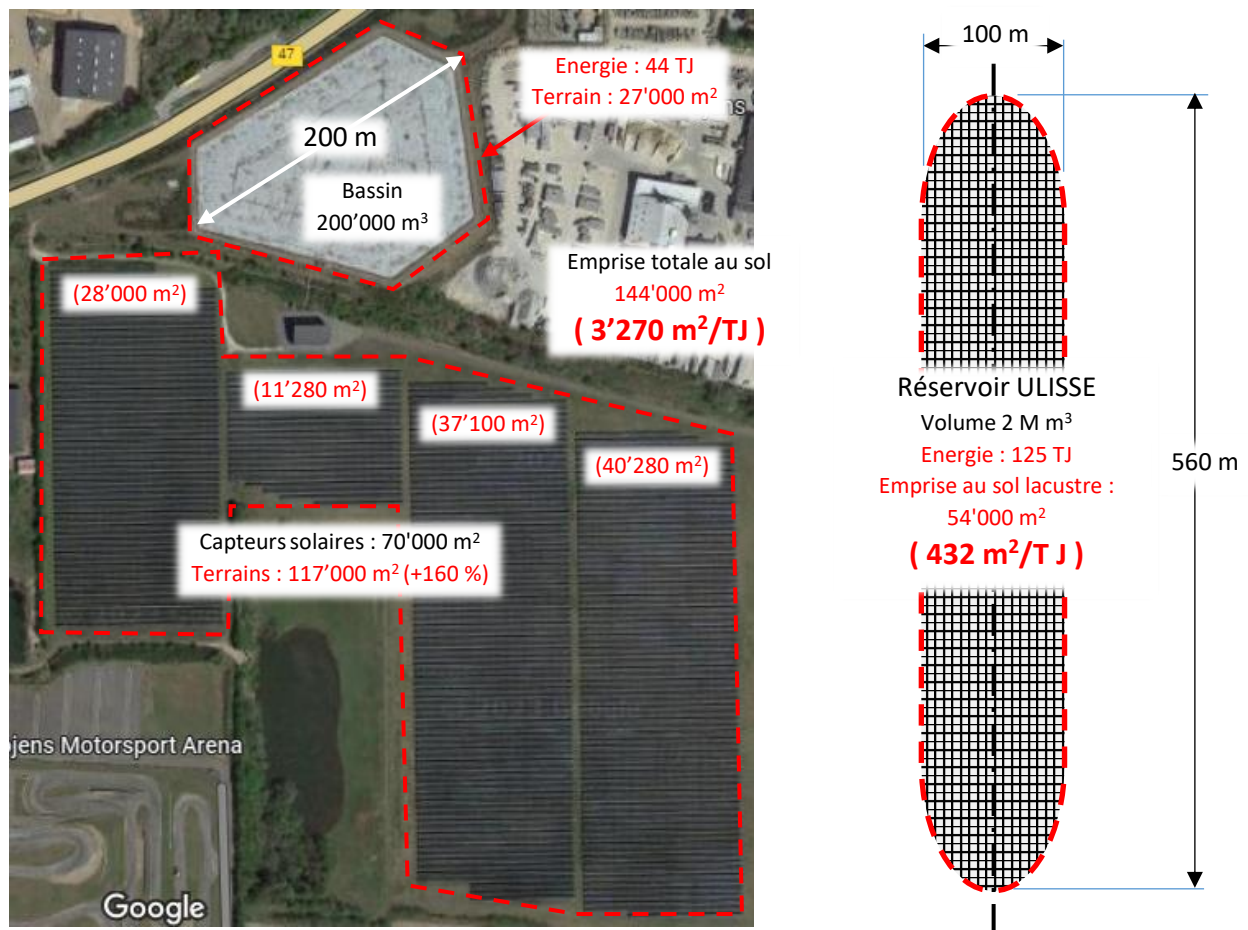


Figure 7.14 : Emprise totale au sol : 144'000 m² (terrain) pour l'infrastructure de captage solaire thermique (70'000 m² de capteurs plan) et du bassin de stockage saisonnier (210'000 m³ avec sa couverture flottante) de l'agglomération urbaine de Vojens fjernvarme (DK) Et comparaison avec un Réservoir type ULISSE.

Le coût financier du captage solaire thermique peut ainsi atteindre le triple du seul dispositif de stockage. Pour exemple à Dronninglund (DK), le bassin couvert de stockage de 62'000 m³ a coûté \approx 2,4 M € et les 37'000 m² de capteur solaire thermique 6.1 M € en 2014 (165 €/m²) ! Il n'est cependant pas précisé si dans ces coûts sont compris le prix du terrain (on pourrait logiquement le supposer). Sur le tableau 7.15 ci-après on observe clairement, par exemple entre Vojens et Dronninglund, que le volume du stockage impacte directement le prix volumique (38 contre 24 €/m³).

Remarque : Si les systèmes de chauffage « solaire terrestre » tels que Vojens et Dronninglund nécessitent moins d'énergie des PAC (2,5 à 3 kWh-é/MWh solaire pour Dronninglund) par des températures plus élevées du réseau CAD, ceux-ci ne peuvent pas d'être utilisés pour la climatisation notamment en free cooling comme les RTL.

	Ottrupgård	Sunstore 2 Marstal	Sunstore 3 Dronninglund	Sunstore 4 Marstal	Vojens	Gram	Toftlund
Project type	Demonstration plants			Commercial plants			
Year of construction	1993-95	2003	2013	2011-12	2014-15	2014-15	2016-17
Size [m ² of water]	1,500	10,000	60,000	75,000	210,000	125,000	85,000
Cost [millions of EUR]	0.23	0.67	2.28	2.67	5.01	4.32	4.11
Price [EUR/m ²]	150	67	38	36	24	34	48
Temperature range [°C]	35-60	35-90	10-89	17-88	40-90	20-90	20-90
Heat storage capacity [MWh]	43.5	638	5,400	6,000	12,180	12,125	6,885
(Dis)charge capacity [kW]	390	6,510	26,100	10,500	38,500	30,000	22,000
Total estimated heat losses [MWh/year]	85	402	1,602	2,475	5,500	4,024	1,900
Heat lost each year related to (dis)charges	22 %	6 %	6 %	24 %	14 %	13 %	9 %
Measured heat loss [MWh/year]	70	n/a	1,175	2,927	n/a	n/a	n/a

Key data on seven Danish pit heat storage systems. Figures are based on data points for 1998-2001 (pilot storage in Ottrupgård), 2013 (Marstal) and 2014 (Dronninglund).
Source: Technology Data for Energy Storage, March 2019 (see p. 46 of the attached PDF)

*Tableau 7.15 : Récapitulatif des plus grandes d'installations solaires thermiques
Avec dispositif terrestre de stockage saisonnier de chaleur pour le chauffage urbain*

7.6.2 Quid d'un réservoir type ou d'un réseau de (300) Réservoirs inédits ULISSE ?

Contrairement aux systèmes de captage thermo-solaire et de stockage saisonnier « conventionnels » décrits précédemment, le réservoir ULISSE (ancré sur le fond lacustre) ne nécessite pas de champ de capteur thermique propre (autre que l'eau sous-lacustre ou de rejets de chaleur), ni d'emprise et d'achat de terrains ni de travaux d'excavation, voire il n'a aucune emprise visuelle sur le paysage, ni d'entrave à la navigation. En revanche, l'activité de la pêche amateur (avec lignes et traînes tractés par bateaux) doit tenir compte de la présence des Réservoirs sous-lacustres pour ne pas accrocher leurs hameçons ! Une cartographie, une géolocalisation et un balisage physique sont donc recommandés.

Les différents aspects liés à ces alternatives de stockage saisonnier de chaleur sont à mettre en perspective vis-à-vis des Réservoirs ULISSE et de leurs coûts d'investissement ; ceci au final pour couvrir une part du déficit structurel et hivernal d'électricité.

Par ailleurs, le coût du réseau de distribution de chaleur à l'agglomération urbaine (RTL) n'entre pas en ligne de compte étant donné que celui-ci est planifié dans la Stratégie énergétique de la Suisse et où ULISSE est « simplement » un booster pour en améliorer l'efficacité énergétique.

Le Réservoir ULISSE est caractérisé par une forme en tunnel hyperbolique, d'un volume unitaire de 2 M m³, une surface d'enveloppe proportionnellement faible (88'000 m²), une structure semi-souple entièrement minérale (verre, basalte), d'une épaisseur de 5 à 10 cm y compris l'isolation thermique. D'autre part, il n'a pas de structure portante par l'auto-portance que confère la densité apparente de l'isolation (verre cellulaire), avec une résistance hydrostatique > 10 bars et une forte résistance à la traction de l'enveloppe faite par une triple couche de textile en fibres de verre E. (30 t/m, facteur 5 de sécurité). L'ancrage sur le fond lacustre est assuré, depuis un navire (sans plongeur ni robot), par des ancrs hélicoïdales invisibles et quasi sans impact (Screw-in Anchor).

Volume Réservoir ULISSE	Vr	m ³	2 000 000
Excursion thermique	ΔT	K	15
Capacité thermique	Ct	GWh ou TJ	35 ou 126
Longueur totale	Lo	m	560
Largeur	La	m	100
Rayon hyperbolique	Rh	m	50
Hauteur sommitale	Hs	m	55
Surface Enveloppe	Senv	m ²	88 000
Surface d'emprise au sol	Ssol	m ²	54 000
Epaisseur Isolation	Epi	m	0,05
Volume Isolation	Vi	m ³	4 400
Surface textiles env.	Stext	m ²	264 000
Epaissuer tri-couches	Etextile	m	0,003
Résistance enveloppe	Rte	t/m	30
Longueur câbles jonctions	Lcâbj	m	32 000
Longueur câbles pourtour	Lcâbp	m	2 000
Poussée Arch. Enveloppe	PAenv	t	3 674
Poussée Arch. eau temp.	PAenv	t	3 520
Poussée Arch. Totale	Pat	t	7 194
Nombre d'ancrages	Nanc	(-)	515

Figure 7.16 : Dimensions principales du Réservoir type ULISSE et Récapitulatif du potentiel du projet ULISSE

7.7 Récapitulatif de comparaison d'ULISSE avec des solutions alternatives

L'infrastructure des réseaux RTL n'est pas prise en compte ici étant donné qu'il est planifié dans le cadre du développement général (Suisse, SES-2050) des Réseaux de Chaleur y compris ceux Lacustres.

Système ULISSE seul (sans CORSAIRE externe) Implantation en 2050 dans les 15 grands lacs Suisses :

- ⇒ Apport d'énergie-chaleur via les RTLs : $Q_c = 50$ PJ/an (1/4 de la population suisse « lacustre », équivalent à 50 GeniLac : ≈ 1 PJ).
- ⇒ Économie d'Électricité Hivernal nette (EEH) : 2,07 TWh-é
- ⇒ Coût financier Réservoir prototype comprenant l'étude ULISSE (2 M m³) : 20 M CHF (sous réserve)
- ⇒ **Coût financier 310 Réservoirs (621 M m³) : 3 G CHF (≈ 50 % économie d'échelle vs le prototype).**

Contribution CORSAIRE (via le REP et externe au RTL)

- ⇒ Apport thermique (Q-cor) : 6,75 PJ
- ⇒ Économie d'Électricité Hivernal nette (ΔE_{cor}) : 0,69 TWh-é
- ⇒ **Coût financier des réseaux d'interconnexion et échangeurs de chaleur : 1 G CHF (hypothèse).**

Total (ULISSE & CORSAIRE)

- ⇒ Économie d'électricité nette (EEHn) : 2,76 TWh-é
- ⇒ Économie d'électricité brute (EEHb) (10 % de pertes de distribution en hiver) : 3 TWh-é
- ⇒ Représente 1/3 du déficit structurel hivernal d'électricité (9 TWh-é)
- ⇒ **Coût financier infrastructures ULISSE + CORSAIRE : 4 G CHF**
- ⇒ **Économie financière d'électricité (320 M CHF/TWh) : 960 M CHF/an (réf. Tab.6.4) [16]**

Alternative par production électrique supplémentaire :

1. Production électrique brute équivalent à 2 Complexes Grande-Dixence : 3 TWh-é hiver
- ⇒ **Coût d'Investissement de 2 Complexes G-D ≈ 19 G CHF (base Tableau 6.4, coût Grande hydraulique)**

Alternative par alimentation de Réseaux Thermiques :

2. RTLs avec capteurs solaires thermiques et stockage saisonnier terrestre : ≈ 57 PJ \Rightarrow § 7.6 (extrapolation de l'installation de Vojens, DK)
 - ⇒ Surface des capteurs solaires thermiques & terrain associé (160 %) : 35 km² & 56 km²
 - ⇒ Volume du stockage thermique saisonnier ($\approx 85^\circ\text{C}$) & surface de terrain : 26 M m³ & 35 km²
 - ⇒ Surface totale d'emprise de terrain (capteurs + stockage) : 91 km² (\approx surface du lac de Zurich)
 - ⇒ Coût d'Investissement champ de capteur solaire (hors coût du terrain) : $\approx 5'800$ M CHF
 - ⇒ Coût d'Investissement du Stockage thermique (hors coût du terrain) : ≈ 780 M CHF
 - ⇒ **Coût d'Investissement total (capteurs + stockage) : 6'580 M CHF (hors achat terrain).**

8 Analyse de forme et dimensionnelle du Réservoir type ULISSE

8.1 Forme hyperbolique transversale de l'enveloppe

L'enveloppe du Réservoir subaquatique type ULISSE est pourvue de pavés d'isolation thermique en verre cellulaire d'une épaisseur d'environ 5 cm. La faible densité du verre cellulaire ($\rho_i = 165 \text{ kg/m}^3$ pour p. ex. le FOAMGLAS-F de Pittsburgh Corning), immergé dans l'eau ($\rho_e \approx 1'000 \text{ kg @ } 20^\circ\text{C}$), représente une densité apparente ($\Delta\rho_i$) d'environ (-) 835 kg/m^3 , qui génère une force d'Archimède (ascendante) volumique (F_{ai}), uniformément répartie sur ladite enveloppe.

$$F_{ai} = \Delta\rho_i = \rho_i - \rho_e = 165 - 1'000 = -835 \quad [\text{kg/m}^3] \quad (8.1)$$

Formellement, cette force F_{ai} est le produit de la masse volumique « apparente » de l'isolant ($\Delta\rho_i$), immergée dans l'eau, avec l'accélération gravitationnelle terrestre ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$), elle s'exprime en Newton par m^3 .

$$F_{ai} = \Delta\rho_i \cdot g = -835 \text{ (kg/m}^3) \cdot 9,81 \text{ (m/s}^2) = -8'191,35 \text{ (kg/m}^2 \text{ s}^2) \approx -8,2 \text{ [kN/m}^3] \quad (8.2)$$

Le signe (-) indique que la force est bien ascendante par la masse apparente (négative).

Cette force volumique (F_{ai}) donne la courbure transversale caractéristique « hyperbolique » de l'enveloppe. Par analogie, c'est aussi la forme (inversée) que prend une **chaînette suspendue par ses extrémités** (Fig. 8.1. ci-dessous), sous l'effet de la pesanteur gravitationnelle. Elle correspond mathématiquement à une courbe plane transcendante de fonction *cosh* (cosinus hyperbolique).

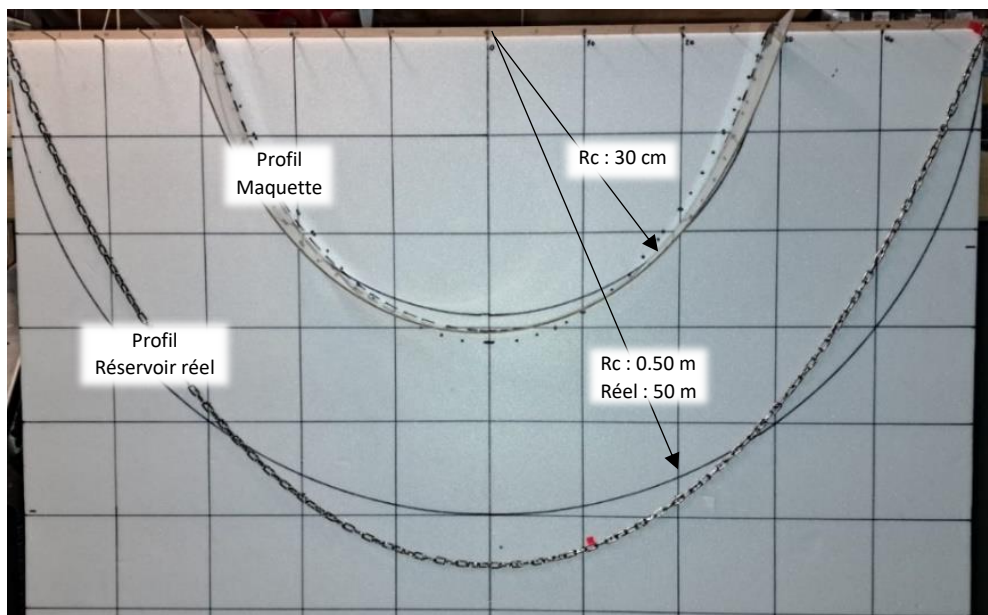


Figure 8.1. Similitude entre la forme de l'enveloppe du Réservoir et une chaînette suspendue entre deux points horizontaux, distance (d) 1 m ou $2R_c$, Longueur (L) 1,57 m ($L = \pi \cdot R_c$). Grille de fond : 10 x 10 cm.

La force d'Archimède que subit l'isolation immergée se traduit par une **Tension (T)** tangentielle dans l'enveloppe de forme hyperbolique. Elle se décompose, sous l'angle α , en une composante verticale T_v et une composante horizontale T_H . Cette dernière est constante en tout point de la courbe et donc aussi à la base des deux points d'ancrage (A, G), à $Y(x = \pm R_c)$ sous l'angle α entre **T** et T_H :

$$T_H = T \cos \alpha \quad [\text{kN}] \quad (8.3)$$

$$\text{avec à la base : } \alpha = \arctang(hx/dx) = 69,3 \quad [^\circ] \quad (8.4)$$

La composante verticale $T_v = T \sin \alpha$, correspond à la force d'Archimède F_{ai} (poids de la chaînette).

L'équation cartésienne de la chaînette ou de l'enveloppe dans le plan transversal est la suivante :

$$Y(x) = a \cosh(x/a) \quad [\text{m}] \quad (8.5)$$

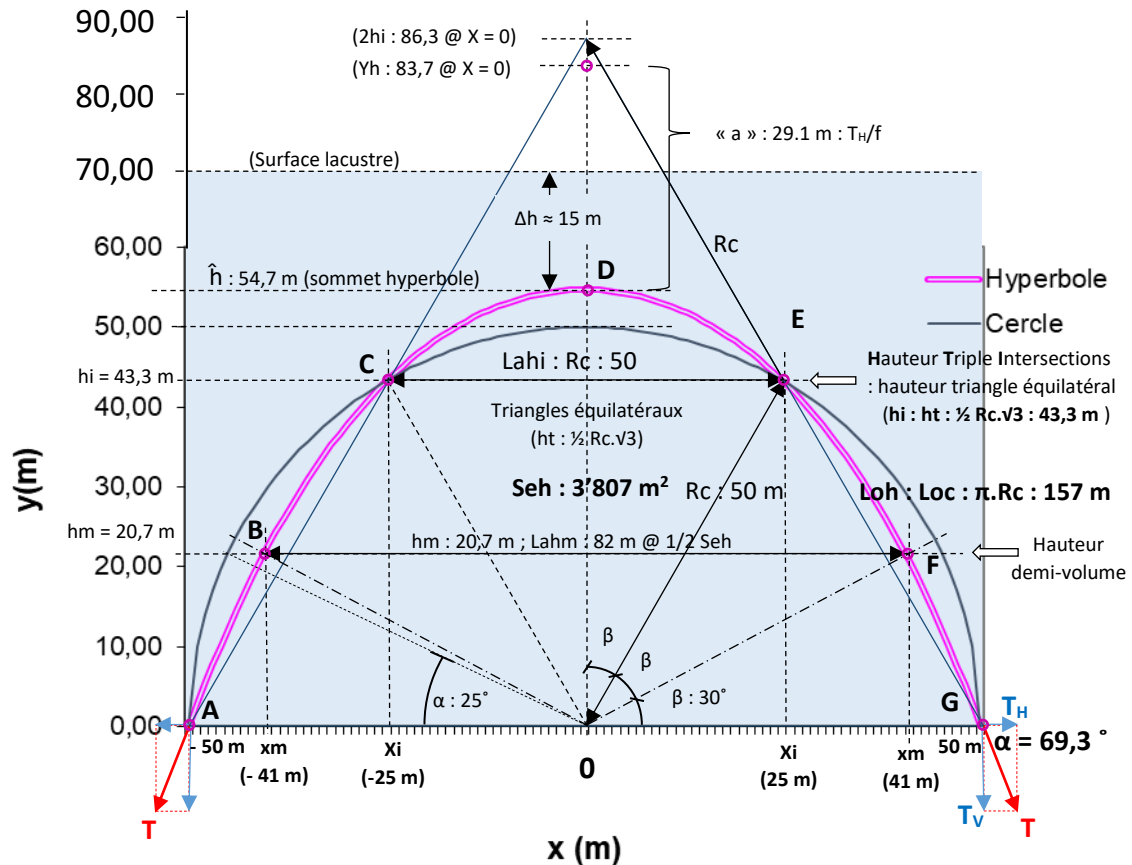


Figure 8.2 : Comparaison courbure transversale **Hyperbolique** de l'enveloppe avec l'arc de cercle

En posant l'égalité de la longueur de l'arc de cercle (Loc) de rayon $R_c = 50$ m avec celle de la courbe hyperbolique de l'enveloppe (Loh), on peut déterminer la valeur du paramètre « a » (29,1 m) :

$$Loc = \pi R_c = Loh = 2 \sqrt{(2a\hat{h} + \hat{h}^2)} = 157,1 \quad [\text{m}] \quad (8.6)$$

$$a = ((Loh/2)^2 - \hat{h}^2) / 2 \hat{h} = 29,1 \quad [\text{m}] \quad (8.7)$$

Par ailleurs, le paramètre « a » = T_H / f , où f est la force linéique (force d'Archimède par unité de longueur de la courbe hyperbolique). Le paramètre « a » est dimensionnellement une longueur [m] et correspond aussi à la distance du sommet de la courbe hyperbolique (\hat{h}) par rapport à son origine cartésienne [sur l'axe central de symétrie Y ($x = 0$)].

Selon l'équation 8.8, avec les conditions 8.6 ($Loh = Loc = 157,1$ m) et 8.7 ($a = 29,1$ m), Y_0 vaut :

$$Y_0 = Y(x=0) = a \cosh (x/a) = 83,8 \quad [\text{m}] \quad (8.8)$$

Le sommet de l'hyperbole (\hat{h}) se situant au point D sur l'axe de symétrie (Y) vaut alors :

$$\hat{h} = Y_0 - a = 83,8 - 29,1 = 54,7 \quad [\text{m}] \quad (8.9)$$

La **Section transversale sous l'enveloppe hyperbolique (Seh)** correspond à l'intégral des surfaces élémentaires ($ds = dy \cdot dx$) entre $x = -R_c$ et $+R_c$, soit la largeur de sa base ($Lahb = 100$ m).

$$Seh = \int dy \cdot dx = 3'807 \quad [\text{m}^2] \quad (8.10)$$

La **Largeur** de l'hyperbole (Lah) varie avec la hauteur [$h_x = F(x)$]. A la base ($h_b : x = 0$, entre les 2 points d'ancrage), elle correspond simplement à 2 rayons de l'arc de cercle :

$$Lah_b = 2R_c = 100 \quad [m] \quad (8.11)$$

A la **moitié de la section hyperbolique** ($Seh/2 = 1'903.5 \text{ m}^2$), la largeur moyenne de l'hyperbole (Lah_m) est de 82 m et est située aux points B et F, à une hauteur de l'hyperbole moyenne (hh_m) de 20,7 m :

$$Lah_m = 2(X_m) = 2 \times 41 = 82 \quad [m] \quad (8.12)$$

$$hh_m = Y_0 - Y_m = [a \cosh(50/a)] - [a \cosh(41/a)] = 83,8 - 63,1 = 20,7 \quad [m] \quad (8.13)$$

La hauteur de l'hyperbole au-dessus de hh_m est égale à :

$$\Delta h_m = \hat{h} - hh_m = 54,7 - 20,7 = 34 \quad [m] \quad (8.14)$$

A l'aide des équations 8.6, 8.7 (a), 8.9 (\hat{h}) et 14 (Δh_m), on détermine la longueur de l'hyperbole Loh_m au-dessus de la demi-section transversale ($Seh/2$) :

$$Loh_m = Loh_b - 2\sqrt{2a\Delta h_m + \Delta h_m^2} = 112 \quad [m] \quad (8.15)$$

Avec la longueur hyperbolique Loh on détermine la Surface hyperbolique (Suh) de l'enveloppe et donc aussi le volume (V) au-dessus dudit niveau (h). Elle permet de calculer la perte thermique de l'enveloppe hyperbolique (Pte), en fonction de sa Surface « active » ($Suha$) délimitée par le niveau de la « *thermocline à front plat* » (Ntc), qui sépare le Volume d'eau chaude « active » (Va) de celui de l'eau froide située en dessous.

8.1 Points remarquables (B, C, E, F)

Sur la figure 8.1, on distingue *trois petits triangles équilatères* et concentriques (O-A-C, O-C-E, O-E-G) dans l'arc de cercle et qui, avec un quatrième (C-H-E) situé au sommet, forment un *grand triangle équilatère* (A-H-G) avec une grande base (A-G) égale à $2R_c$ (Lah_b).

Par ailleurs, aux points C et E (de coordonnées $y_i, -/ +x_i$), une triple intersection de l'hyperbole avec l'arc de cercle (et le grand triangle équilatère) se fait symétriquement par rapport à l'axe central Y. La largeur de l'hyperbole (Lah_i) entre ses deux points (C-E) d'intersection est égale à la moitié de la largeur de la base ($Lah_b/2$) ou égale au rayon R_c (50 m).

$$Lah_i = R_c = 50 \quad [m] \quad (8.16)$$

De plus, la hauteur (h_i) des deux points (C, E) d'intersection correspond précisément aux sommets et donc à la hauteur des petits triangles équilatéraux (h_t).

$$h_i = h_t = \sqrt{3} \times R_c/2 = 43,3 \quad [m] \quad (8.17)$$

On obtient aussi la valeur de h_i (ou de h_t), avec la projection sur l'axe horizontal (X), à une distance ($x_i = R_c/2 = 25 \text{ m}$) de l'axe central Y :

$$h_i = Y_0 - Y_i = [a \cosh(50/a)] - [a \cosh(25/a)] = 83,8 - 40,5 = 43,3 \quad [m] \quad (8.18)$$

Selon la même procédure que (8.13) et (8.14), on détermine la hauteur de l'hyperbole au-dessus du niveau des deux points d'intersection (Δh_i) ainsi que la longueur de l'hyperbole au-dessus (Loh_i) :

$$\Delta h_i = \hat{h} - h_i = 54,7 - 43,3 = 11 \quad [m] \quad (8.19)$$

$$Loh_i = Loh - 2\sqrt{2a\Delta h_i + \Delta h_i^2} = 56,4 \quad [m] \quad (8.20)$$

La partie de la Section transversale hyperbolique (Seh), respectivement en dessous $Seh(h_i)$ et au-dessus $Seh(\hat{h})$ du niveau de l'intersection (h_i) peut se déterminer de la manière suivante :

avec la double intégration des demi-surfaces élémentaires ($ds = dy \cdot dx$), entre $x = R_c$ à $R_c/2$,

$$Seh(h_j) = h_i \times Lai + 2 \int dy \cdot dx = (43,3 \times 50) + (2 \times 672,5) = 3'510 \quad [m^2] \quad (8.21)$$

$$Seh(h_i) = St - St(h_j) = 3'807 - 3'510 = 297 \quad [m^2] \quad (8.22)$$

La section hyperbolique au-dessus du niveau de l'intersection Seh(hî) représente 8% de Seh.

Les points B et F correspondant au niveau (hm), de demi-section transversale de l'hyperbole (Seh/2), **sont situés sur les bissectrices O-B et O-F des deux petits triangles équilatéraux**, respectivement O-A-C et O-E-F. Les bissectrices avec la base A-G sur l'abscisse X forment un angle β (30°).

Le niveau moyen de l'hyperbole hh_m (B-F, à 20,7 m d'hauteur) correspond à sa demi-section transversale et au **centre de gravité à température homogène dans tout le Réservoir**. L'angle bissectrices (O-B-F) égal à 4β , soit 120°. Pour l'arc de cercle (Rc), la hauteur du « *centre de gravité homogène* » est sensiblement la même (hmc) mais l'angle $\alpha = 25^\circ$ ne correspond pas auxdites bissectrices.

$$hmc = Rc \sin \alpha = 21 \quad [m] \quad (8.23)$$

8.2 Extrémités demi-hyperboloïde du Réservoir

La forme des deux demi-calottes des extrémités du Réservoir présente la même courbure hyperbolique que celle de la section transversale dans sa partie rectiligne. Elles ont donc chacune une **forme de demi-hyperboloïde** de révolution (180°) autour de l'axe Y, avec à la base le rayon Rc (50 m).

Pour une longueur transversale hyperbolique de l'enveloppe (Loh = Loc = 157 m, hypothèse de départ), la Surface des deux demi-calottes hyperboloïdes des extrémités (Suc) reste égale à celle d'une « calotte » demi-sphérique équivalente de rayon Rc.

$$Suc = 2 \pi Rc^2 = 15'708 \quad [m^2] \quad (8.24)$$

La section hyperbolique (Seh = 3'807 m²) est par contre légèrement moindre (-3%) par rapport à celle de l'arc de cercle (Sac) de rayon Rc :

$$Sac = 1/2 \pi Rc^2 = 3'927 \quad [m^2] \quad (8.25)$$

Le volume équivalent demi-sphérique (Vs) étant simplement égal à :

$$Vs = 2/3 \pi Rc^3 = 261'800 \quad [m^3] \quad (8.26)$$

Comparativement à la demi-sphère, le volume des calottes hyperboloïdes (Vc) des extrémités du Réservoir est inférieure à 8'000 m³ (3 %) et ce dans le rapport des sections Seh et Sac (0,97) :

$$Vc = Vs \times Seh/Sac = 253'800 \quad [m^3] \quad (8.27)$$

Avec le volume des calottes hyperboloïdes des extrémités du Réservoir (Vc) et leur surface (Suc), on peut leur associer une longueur rectiligne équivalente (Locéq) :

$$Locéq = Vc / Suc = 16,16 \quad [m] \quad (8.28)$$

8.3 Longueur, Surface et Circonférence du Réservoir type ULISSE

Le volume du Réservoir dans sa partie linéaire (Vl) (sans les calottes) égal à son volume total (Vt : 2 10⁶ m³) moins celui des calottes des extrémités (Vc) :

$$Vl = Vt - Vc = 1'746'200 \quad [m^3] \quad (8.29)$$

Avec la section hyperbolique du Réservoir (Seh), sa longueur linéaire (Lol) égale à :

$$Lol = Vr / Seh = 458,7 \quad [m] \quad (8.30)$$

La longueur totale du Réservoir (Lot) est alors simplement :

$$Lot = Lol + 2Rc = 558,7 \quad [m] \quad (8.31)$$

Avec les équations (8.6) et (8.30), on détermine la Surface linéaire de l'enveloppe (Sul) :

$$Sul = Loh \times Lol = 157,1 \times 458,7 = 72'062 \quad [m^2] \quad (8.32)$$

La surface totale de l'enveloppe hyperbolique du Réservoir (Sut) est alors la somme de la partie linéaire (Sul) et, selon l'équation (8.1), celle des calottes d'extrémités (Suc) :

$$Sut = Sul + Suc = 72'062 + 15'708 = 87'770 \quad [m^2] \quad (8.33)$$

La longueur de la circonférence (Locir) à la base du Réservoir est de :

$$Locir = (2 \pi Rc) + 2Lorr = 1'234 \quad [m] \quad (8.34)$$

$$\text{Emprise sur le fond lacustre (Ssol)} : Ssol = (Lol * 2Rc) + (\pi Rc^2) = 54'000 \quad [m^2] \quad (8.35)$$

h	: sommet hyperbolique du Réservoir type ULISSE	: 54,7	[m]	(8.9)
hh _m	: hauteur moyenne de hyperbole (demi section)	: 20,7	[m]	(8.13)
hmc	: hauteur moyenne du cercle de base	: 21	[m]	(8.23)
Lah_b, m, i	: Largeur hyperbole de base, moyenne, intersection	: 100	[m]	(8.11)
Loc	: Longueur de l'arc de cercle de base	: 157,1	[m]	(8.6)
Locéq	: Longueur équivalente des calottes d'extrémités	: 16,16	[m]	(8.28)
Locir	: Longueur circonférentielle de la base du Réservoir	: 1'234	[m]	(8.34)
Loh	: Longueur transversale hyperbolique du Réservoir	: 157,1	[m]	(8.6)
Lol	: Longueur linéaire du Réservoir	: 458,7	[m]	(8.30)
Lot	: Longueur totale du Réservoir	: 558,7	[m]	(8.31)
Sac	: Section de l'arc de cercle de base	: 3'927	[m ²]	(8.24)
Seh	: Section transversale hyperbolique du Réservoir	: 3'807	[m²]	(8.10)
Suc	: Surface des calottes d'extrémités du Réservoir	: 15'708	[m ²]	(8.14)
Sul	: Surface de la partie linéaire du Réservoir	: 72'062	[m ²]	(8.32)
Sut	: Surface totale hyperbolique du Réservoir	: 87'770	[m ²]	(8.33)
Ssol	: Surface d'emprise au fond lacustre du Réservoir	: 54'000	[m ²]	(8.35)
Rc	: Rayon de l'arc de cercle de base	: 50	[m]	(8.16)
Vc	: Volume des calottes d'extrémités du Réservoir	: 253'800	[m ³]	(8.27)
Vs	: Volume demi-sphérique de base	: 261'800	[m ³]	(8.26)
VI	: Volume linéaire du Réservoir	: 1'746'200	[m ³]	(8.29)
Vt	: Volume totale du Réservoir	: 2'000'000	[m³]	(8.29.bis)
Ct	: capacité thermique @ ΔT : 15 K	: 126	[TJ]	(7.8)
Fat	: Force d'Archimède totale nominale @ ΔT : 15 K	: ≈ 7'000	[t]	(8.39)

Tableau 8.3 : Tableau récapitulatif alphabétique des abréviations, valeurs, unités et références d'équations

8.4 Impacts de la température et de la densité de l'eau sur le Réservoir ULISSE

8.4.1 Forces d'Archimède et de traction sur l'enveloppe

La densité apparente de l'isolation ($\Delta\rho_i$: - 835 kg/m³), qui donne la forme transversale hyperbolique caractéristique du Réservoir ULISSE (§ 8), génère une force de traction constante sur l'enveloppe (F_{ti}), proportionnelle au volume d'isolation. Le volume d'isolation (V_i : 4'388 m³) correspond à la surface hyperbolique de l'enveloppe (S_{env}) multipliée par son épaisseur (ϵ = 0.05 m) :

$$F_{ti} = \Delta\rho_i \times V_i = 835 \times 4'388 \times 0.05 = 3'664 \quad [10^3 \text{ kg}] \quad (8.36)$$

La différence de densité de l'eau ($\Delta\rho_e$), entre celle du Réservoir (ρ_r) avec celle du lac (ρ_l), est liée à leur écart de température (ΔT). Elle engendre une force d'Archimède volumique sur l'eau du Réservoir qui est variable (F_{ev}). Avec une température de l'eau du lac à 5 °C et un Réservoir à 20 °C, soit un ΔT de 15 K, elle vaut :

$$F_{ev} = \Delta\rho_e = \rho_r - \rho_l = -1,76 \quad [\text{kg/m}^3] \quad (8.37)$$

Avec cet écart de densité volumique ($\Delta\rho_e$) de -1.76 kg/m³, le Réservoir subit au niveau de son enveloppe une force de traction variable (F_{te}), proportionnelle à son volume (V : 2.10⁶ m³) :

$$F_{te} = \Delta\rho_e \times V = 1.76 \times 2.10^6 = 3'520 \quad [10^3 \text{ kg}] \quad (8.38)$$

$$\text{La poussée d'Archimède totalise (éq.8.36 + 8.38) : } F_{at} = 7'184 \quad [10^3 \text{ kg}] \quad (8.39)$$

En chiffres ronds, l'enveloppe et l'ancrage du Réservoir ULISSE doivent ainsi résister à plus de 7'000 t de forces de traction (8.39). La moitié soit 3'500 t constantes générées par l'isolant (8.36) et entre 0 et 3'500 t générées dynamiquement en fonction du taux de charge en eau chaude à l'intérieure du Réservoir (8.37).

Il en résulte une force de traction linéaire (F_{tl}) répartie sur la circonférence de l'enveloppe (L_{cir} , 8.34), qui fluctue entre un minimum de 3 t/m et un maximum de 6 t/m :

$$F_{tl-min} = F_{ti} / L_{cir} = 3'664 \text{ } 10^3 / 1'234 = 2,97 \quad [10^3 \text{ kg/m}] \quad (8.40)$$

$$F_{tl-max} = (F_{ti} + F_{te}) / L_{cir} = 7'184 \text{ } 10^3 / 1'234 = 5,82 \quad [10^3 \text{ kg/m}] \quad (8.41)$$

8.4.2 Pression hydrostatique sur l'enveloppe

La pression hydrostatique est également fonction de la hauteur de la colonne d'eau chaude dans le Réservoir. Elle augmente vers le sommet et fonction du remplissage thermique du Réservoir. La courbe de l'enveloppe s'approche alors de « l'intéaire », ou courbe dite de la « bache » (par analogie avec la chaînette hyperbolique), et dont la courbure est proportionnelle à la hauteur et à la température de l'eau chaude dans le Réservoir.

La différence de pression hydrostatique (Δp_h) augmente avec la hauteur de colonne d'eau dans le Réservoir. Elle est maximale au sommet, soit 10 mbar (1.76 kg/m³ x 55 m \approx 100 kg/m²). La Δp_h moyenne se situe au niveau du centre de gravité du volume d'eau, à 34 m du sommet (1- 0.4244 Rc) et vaut donc 60 kg/m² ou 6 mbar.

Pour mémoire, une pression de 1 mbar correspond à 1 cm d'hauteur de colonne d'eau (@ 20°C). La pression moyenne sur l'enveloppe (Δp_h) correspond alors à environ 6 cm de colonne d'eau, ce qui est relativement faible. **Elle peut néanmoins générer des fuites d'eau au travers de la perméabilité hydraulique de l'enveloppe.** De plus, la Δp_h produit une contrainte mécanique sur l'enveloppe qui dépend de sa surface et de l'écartement longitudinal (\approx 2m) entre les câbles de reprise des forces par les ancrages dans le fond lacustre.

8.4.3 Propriétés des matériaux constitutifs de l'enveloppe du Réservoir ULISSE

L'enveloppe du Réservoir ULISSE doit remplir deux fonctions principales : contenir le volume d'eau stockée (étanchéité hydraulique) dans le lac et minimiser sa déperdition thermique (étanchéité thermique) ; ceci sur une période étendue (stockage saisonnier d'énergie-chaleur).

Les éléments constituant l'enveloppe (textiles, isolant, câbles, pièces de jonctions, etc.) doivent répondre à de multiples critères techniques et environnementaux : pouvoir isolant thermique, auto-portance, résistance à la pression hydrostatique (isolant), à la traction et souplesse (textiles, câbles), hydrophobe, étanche à la vapeur, inoxydable, imputrescible, biocompatibilité, énergie grise et émission de GES minimaux à la fabrication, recyclable (économie circulaire).

Pour ce faire, la structure de l'enveloppe est constituée de 3 couches de textiles en fibre de verre E qui contiennent des pavés isolant en verre cellulaire.

La fibre de verre E est produite à base d'oxyde de bore mélangé à de la silice, de la chaux, alumine et de magnésie, fondue à 800 °C puis affinée à 1'500 °C. La résistance à la traction sur la masse volumique de la fibre de verre E est supérieure à celle de l'acier. Le feutre des joints intercalaires et autour (couche anti-abrasion) des pavés isolants de l'enveloppe ULISSE est en fibre de verre E (ou de basalte) avec une faible conductivité thermique (0.03 W/m.K). La fibre supporte des températures de plus de 600 °C, est **incombustible, imputrescible et inorganique, compatible avec des matrices organique (biocompatible)**. Sources : *Final Advanced Materials Sàrl/GmbH, KLEVERS GmGh*.



Figure 8. 4 : Textile et feutre en fibres de verre type E (photo final-materials.com), d. Fibres de verre et de basalte

Les textiles techniques en fibres de verre E sont principalement utilisés depuis 1930, pour leur résistance thermique à haute température, dans le domaine de la protection incendie (rideaux anti-feu et pare-fumée), l'isolation thermique et acoustique dans l'industrie navale, automobile, aéronautique, métallurgie et des fours.

À titre d'exemple, l'entreprise KLEVERS GmbH en Allemagne produit des textiles en fibre de verre E, (*KlevoGlass*), dans des grammages compris entre 160 et 1050 g/m², avec des épaisseurs de 0.18 à 1.3 mm et des largeurs jusqu'à 310 cm. Ceux-ci peuvent être renforcés de fils en acier inoxydable (V4A).

Si une tenue aux très hautes températures (≥ 600 °C) n'est pas un critère pour l'enveloppe du Réservoir ULISSE, la résistance à la traction est par contre cruciale. Elle peut atteindre les 900 N/cm soit **9 tonnes au mètre de largeur de textile** (selon la norme européenne : EN ISO 13934-1), ce qui (selon l'éq. 8.5) est **1,5 fois la charge linéaire maximum de 6 t/m à laquelle est soumise l'enveloppe ULISSE**.

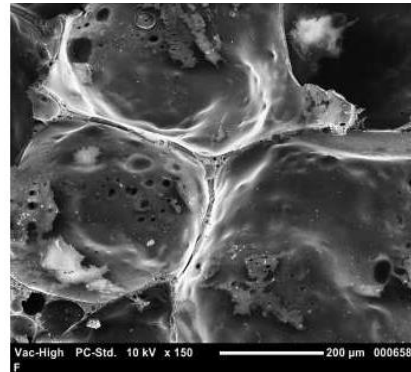
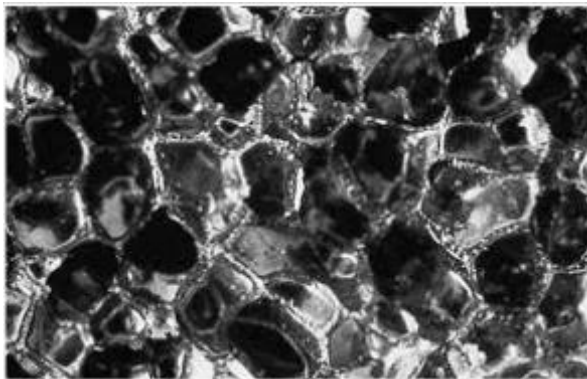
8.4.4 L'isolation thermique de l'enveloppe hyperbolique du Réservoir ULISSE

Certains isolants thermiques (p.ex. polystyrène extrudé) utilisés dans le domaine du bâtiment supportent une résistance modérée à la compression (isolation de dalle de sol, etc.) mais pratiquement seul le verre cellulaire cumule résistance à la compression et une totale étanchéité à l'eau. Toutefois **l'utilisation en immersion profonde et sous pression hydrostatique élevée (≥ 7 kg/cm²) est inédite**.

Le verre cellulaire (à base d'environ 60% de verre plat recyclé, parebrises, fenêtres) est obtenu principalement par oxydation (CO₂) et expansion thermique d'additifs tels que carbonate de sodium, dolomite, feldspath et une petite quantité d'oxyde de fer.

Le procédé de fabrication du verre cellulaire est inventé par l'ingénieur français Bernard Long (brevet Saint-Gobain 1934). Il a été cédé en 1942 à Pittsburgh Corning Corporation (USA) qui a continué son développement et sa production. Initialement le verre cellulaire est utilisé (marginale) en tant qu'isolant et durant la seconde guerre mondiale comme **flotteurs marins (balises de protection, radeaux, bateaux de sauvetage)**.

Depuis 1964, la première unité de production européenne a débuté en Belgique (Tessenderlo), puis en 2008 en République Tchèque (Klasterec).



Figures 8.5 : Images au microscope de cellules de verre cellulaire (source FOAMGLAS)

Aujourd'hui le verre cellulaire est couramment utilisé pour l'isolation thermique des bâtiments, tout particulièrement pour ses propriétés hygroscopiques (totale étanchéité à l'eau et à la vapeur) et de résistance à la compression (sans déformation). Ces propriétés le rendent très adapté à l'isolation de toitures plates et de sols fortement chargés (carrossables).

Le verre cellulaire a une très bonne résistance à la compression, de 500 à 1600 kPa, en fonction de la masse volumique (100 à 165 kg/m³). Le fabricant (Pittsburgh Corning) n'a néanmoins pas pu donner de valeurs en immersion d'eau sous haute pression hydrostatique telle que recherchée pour l'isolation de l'enveloppe du Réservoir d'ULISSE.

8.4.5 Procédure et organisation des essais hydrostatique sur l'isolation

Cette information capitale, pour l'isolant-porteur de l'enveloppe du Réservoir ULISSE, a été obtenue par des essais, réalisés personnellement sur un échantillon d'une plaque standard de FOAMGLAS (type T3+, ρ : 100 kg/m³, 80 x 600 x 450 mm) fournie gracieusement par le représentant de suisse romande (M. Stanislas De Froment, Pittsburgh Corning Schweiz AG).

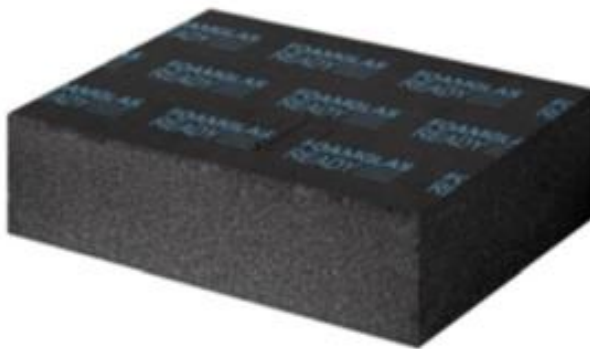


Figure 8.6 : Panneau en verre cellulaire FOAMGLAS® T3+



Figure 8.7 : Échantillon gauche : 165, droite 100kg/m³

Selon la figure 8.8 ci-dessous, l'essai hydrostatique sur l'échantillon de verre cellulaire est réalisé à l'aide d'un réservoir-accumulateur d'un groupe hydrophore d'arrosage (volume +/- 10 litres). Il est mis sous pression hydrostatique progressive avec un minimum d'air comprimé au sommet du Réservoir, minimisant l'énergie potentielle d'expansion en cas de rupture du Réservoir (procédé classique pour les essais sécurisés des Réservoirs sous pression hydraulique).

Le choix de ce réservoir de pressurisation est motivé par son large couvercle de fermeture (diamètre de l'orifice : 10 cm), normalement destiné à l'introduction de la « boudruche » d'expansion en caoutchouc dudit réservoir de pressurisation hydrophore d'arrosage du commerce « on de shelf ».

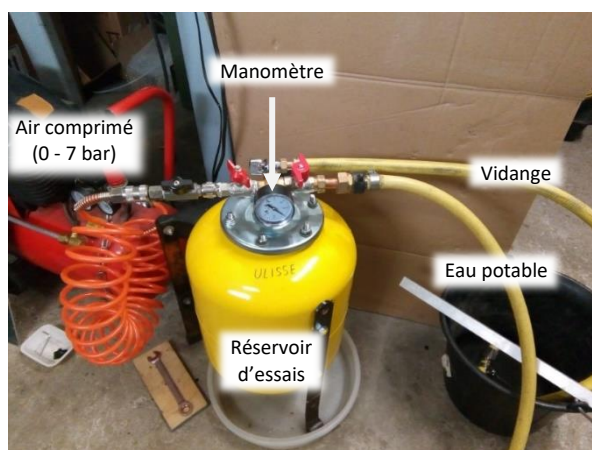


Figure 8.8 : Agencement général de l'essai hydrostatique du verre cellulaire FOAMGLAS

L'échantillon de verre cellulaire de FOAMGLAS (type T3+) est placé dans un petit bocal en verre transparent pour recueillir les éventuelles particules de verre cellulaire pouvant se détacher de l'échantillon en cas d'un écrasement ou effritement sous l'effet de la pression d'eau (Fig. 5). Le bocal est ensuite fermé par un couvercle muni de trous permettant l'échappement de l'air. L'ensemble est introduit par l'orifice du réservoir de pressurisation hydraulique (vase accumulateur, Fig. 8.10).

Le réservoir est fermé par le couvercle (6 boulons M8) comportant un raccordement avec vanne au réseau d'eau potable, une vanne de vidange hydraulique et aéraulique, un raccordement à l'air comprimé et un manomètre (graduations 0 à 6 bars). Le Réservoir est ensuite entièrement rempli d'eau (+/- 10 litres) via le réseau d'eau, puis mis sous pression (régulée) avec l'air comprimé fourni par le compresseur (max. 8 bars).

Les essais ont été réalisés au mois de janvier 2022. Les montées progressives en pression sont réalisées par paliers avec des contrôles intermédiaires de l'intégrité de l'échantillon (dimensions, recherche de particules de verre précipités dans le bocal). Les dimensions de l'échantillon sont de 30 x 35 x 75 mm.



Fig. 8.9 : échantillon de verre cellulaire et bocal



Fig. 8.10 : échantillon avant l'immersion

Date	heure début	heure de fin	durée (H)	pression (bar)	observation
26/01/22			12	1,5	Échantillon idem
27/01/22			1	3	Échantillon idem
27/01/22	12h00	15h00	3	3,5	Échantillon idem
27/01/22	15h45	15h20 (28/01)	24	4	Échantillon idem
28/01/22	18h00	16h00 (29/01)	22	5	Échantillon idem
29/01/22	18h30	15h30 (30/01)	21	5,5	Échantillon idem
30/01/22	15h30	18h00 (30/01)	2,5	6	Échantillon idem
30/01/22	19h00	10h40 (01/02)	39	≥ 7	Échantillon idem
01/02/22	12h15	fin des essais		≥ 7	Échantillon idem

Tableau 8.11 : Tableau des essais sous pression (montée en pression progressive, avec contrôles intermédiaires)

8.4.6 Conclusion des essais hydrostatiques

L'échantillon n'a subi aucune altération pour les paliers de pression jusqu'à 7 bars (maximum disponible par le compresseur). L'échantillon en verre cellulaire est issu d'une plaque standard « d'entrée de gamme » FOAMGLAS, d'une masse volumique de 100 kg/m^3 et une résistance à la compression de 500 kPa ou 5 bars (test EN 826). Le verre cellulaire FOAMGLAS type « F » a une masse volumique de 165 kg/m^3 et une résistance à la compression de 1'600 kPa (160 tonnes / m^2), ce qui correspond à une pression de 16 bars ou 160 mètres de colonne d'eau.

Dans le secteur du bâtiment, les isolants de sols sont soumis à des charges dynamiques de compression et de déformation par la circulation sur la dalle, par exemple en toiture terrasse, parking, etc.

Conventionnellement, les essais en compression sur matériaux isolant se font selon la norme européenne EN 826 avec une force uniquement axiale et en milieu sec (Figure 8). Sous l'effet de la force unidirectionnelle, le matériau va à minima se déformer ou se rompre.

La pression hydrostatique sur un corps immergé dans l'eau se produit quant à elle de façon isotrope, ce qui va favorablement équilibrer et répartir les contraintes (concentriques) sur la structure matricielle du corps et donc augmenter sa tenue (Figure 9).

Il n'est donc pas étonnant d'observer que l'échantillon (annoncé avec une résistance à la compression de 5 bars selon la norme EN 826) résiste parfaitement à une pression hydrostatique de 7 bars. Par ailleurs, la pression hydrostatique varie uniquement en fonction de la profondeur de l'eau. La mise en place de l'enveloppe du Réservoir ULISSE se ferait avec une descente progressive jusqu'à la profondeur requise et ne subirait donc pas de fluctuation de la pression sur le verre cellulaire.

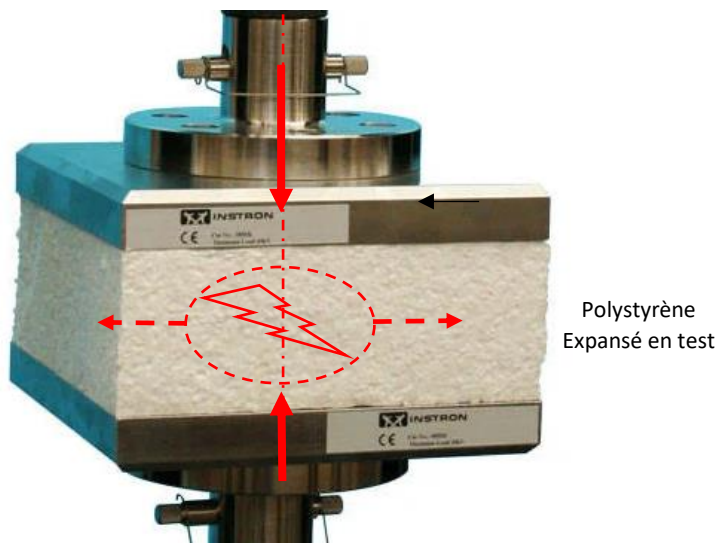


Fig. 8.12 : Machine d'essai en compression mono-axiale pour panneaux d'isolation thermique selon la norme européenne EN 826 (photo instron.com)

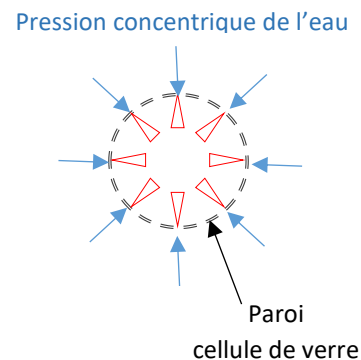
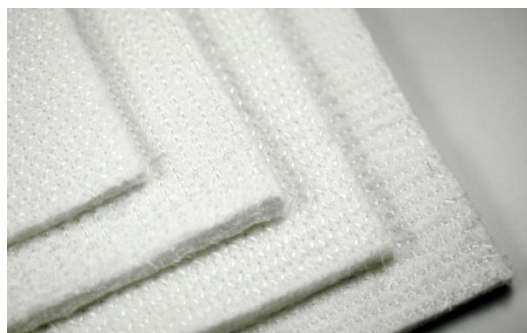


Fig. 8.13 : pression hydrostatique isentrope (concentrique)

8.4.7 Protection contre l'abrasion du verre cellulaire

Les fines parois du verre cellulaire le rendent très abrasif et même friable. C'est moins le cas avec l'augmentation de la masse volumique du fait de l'épaisseur desdites parois (voir Fig. 8.7). Il est donc impératif d'éviter que les pavés d'isolation de l'enveloppe ne se touchent en bougeant entre eux !

Une protection est donc recommandée, sous la forme d'un enrobage individuel (manteau), par exemple, au moyen d'une nappe de feutre de verre ou de basalte, identique aux joints intercalaires. À titre d'exemple aussi, le panneau FOAMGLAS® BOARD F, au format 1200 x 600 mm, a ses deux faces revêtues d'un voile de verre.



(Source : HKO.de)

Figure 8.13.1 : Feutres de verre aiguilletés et surpiqués avec du fil à coudre de verre comme anti-abrasion du verre cellulaire

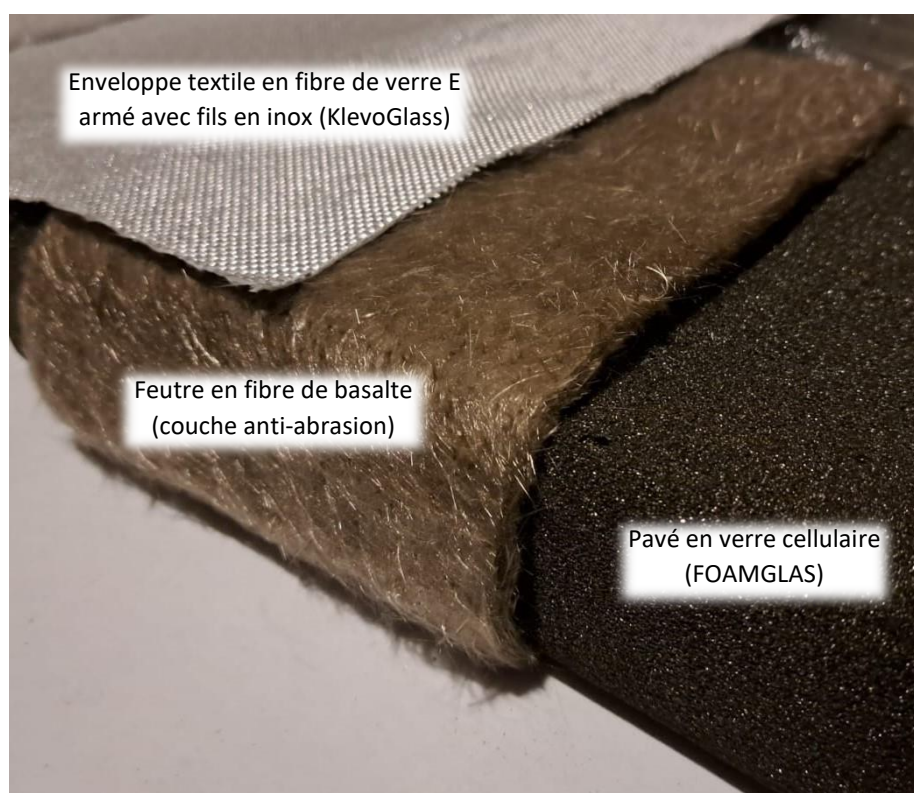


Figure 8.13.2 : Exemple de disposition intermédiaire d'une couche de feutre de basalte anti-abrasion du verre cellulaire

Par sa relative incompressibilité, le verre cellulaire est rigide et les blocs ou pavés isolant sont indéformables. Leur résistance à la flexion est ≥ 550 kPa (EN 12089) et leur résistance à la traction est ≥ 200 kPa (EN 1607). **La courbure de l'enveloppe « semi-rigide/souple » du Réservoir ULISSE peut se faire uniquement au niveau des joints intercalaires desdits pavés d'isolation.**

8.5 Éléments de jonctions de l'enveloppe

Les joints intercalaires des pavés isolants permettent de suivre la courbure hyperbolique de l'enveloppe par les degrés de liberté d'orientation (α) entre les pavés qui sont rigides (Fig. 8.14). Les joints intercalaires, dont la Ctj est plus importante que celle des pavés isolants, vont constituer des « *ponts thermiques* », additionnés de ceux des jonctions des bandes de l'enveloppe (Fig. 8.16).

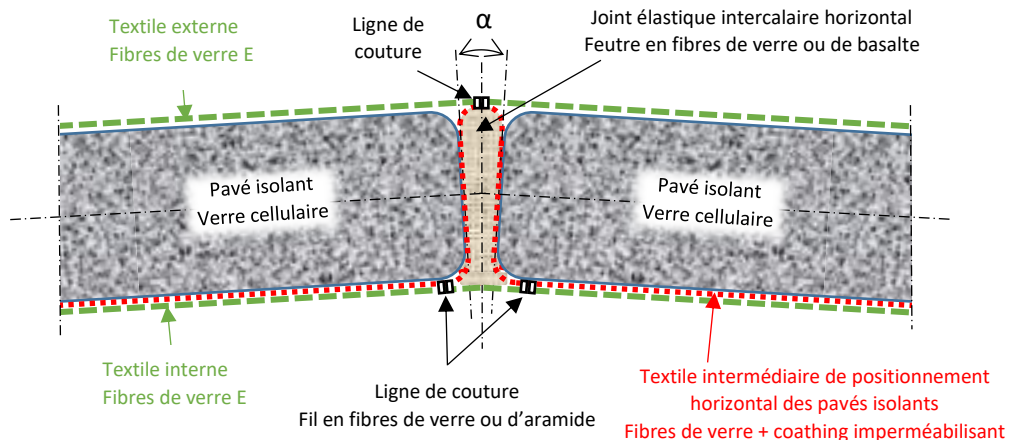


Figure 8.14 : Coupe transversale partielle de l'enveloppe du Réservoir type (entre les pavés isolants)

L'enveloppe du Réservoir est subdivisée en bandes de 12 m de large en forme d'arche hyperbolique. Les bords sont parallèles dans la partie longitudinale du Réservoir et cintrés sur les *demi-calottes hyperboloïdes* des deux extrémités. Ces bandes d'enveloppe sont reliées entre elles par des *mâchoires de jonction* symétriques.

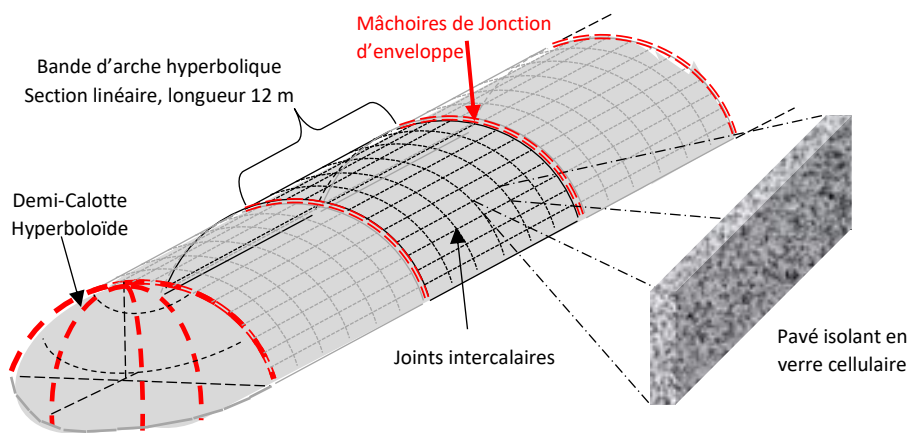


Figure 8.15 : Schéma d'assemblage de l'enveloppe du Réservoir type (l'échelle des éléments n'est pas respectée)

Aux bords des bandes, les trois couches de textiles entourent un câble en acier inoxydable qui ensemble sont serrés et maintenus entre les mâchoires de jonction (Fig. 8.16). Un joint plat est pris en sandwich à l'intérieur et assure l'étanchéité de la jonction des bandes.

Les mâchoires sont constituées symétriquement de deux méplats (4 x 1 cm) en acier inoxydable, espacés d'environ 5 mm et jumelés par des vis à têtes coniques pour un serrage central (espacement entre les vis : 0.1 m). Les méplats sont partiellement incurvés pour entourer et maintenir ensemble les câbles avec les trois couches de textiles.

Juxtaposés le long du bord des bandes d'enveloppe, ses mâchoires de jonction ont individuellement une longueur égale à la hauteur des pavés, permettant ainsi de suivre la courbure de l'enveloppe. Finalement, pour réduire le pont thermique, l'espace de la jonction est garnie et couverte de feutres isolants qui sont protégés de chaque côté par une tôle en acier inoxydable (*bouclier de couverture*).

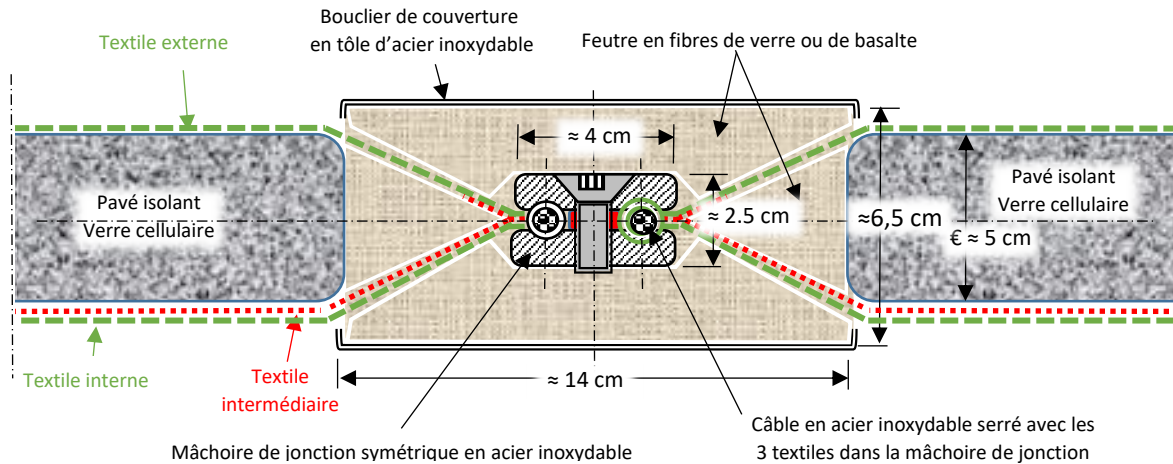


Figure 8.16 : Coupe perpendiculaire au niveau de la jonction des bandes de l'enveloppe

8.6 Analyse du transfert de chaleur par l'enveloppe du Réservoir ULISSE

8.6.1 Généralité

La puissance dissipative de chaleur (Q) au travers de l'enveloppe du Réservoir type ULISSE est le produit du *Coefficient de transfert thermique* U (W/m^2K) avec la surface S (m^2) et avec l'écart de température ΔT (K) entre le Réservoir et le lac.

$$Q = U.S.\Delta T_{\text{res-lac}} \quad [W] \quad (8.42)$$

$U.S$ est la *Conductance thermique* C_t (W/K) ou l'inverse de la *Résistance thermique* R_t (K/W).

L'efficacité du stockage, de longue durée (saisonnier) de l'eau chaude dans le Réservoir sous-lacustre, *ceteris paribus*, augmente avec le rapport entre son Volume et la Surface de son enveloppe ainsi qu'avec la *Résistance thermique* (R_t) de cette dernière. L' R_t ou à l'inverse la conductance thermique (C_t) de l'enveloppe est essentiellement déterminée par celle des pavés isolants en verre cellulaire (C_{tp}), celle des *joints intercalaires* (C_{tji}) et celle des *jonctions* des bandes de l'enveloppe (C_{tjb}).

On peut relativement négliger la résistance thermique des fines tôles en acier inoxydable des boucliers de couverture (épaisseur 1 mm, $\lambda_{\text{inox}} : 14 W/mK$) des zones de jonction ainsi que celles des 3 couches de textiles en fibre de verre (armés de fils en acier inoxydable).

Outre que les textiles ont également une faible épaisseur (≈ 1 mm) et que leurs mailles sont ouvertes, la convection libre ainsi que les courants de circulation de l'eau (advection) autour de l'enveloppe du Réservoir subaquatique, réduisent au maximum la résistance thermique de l'eau (couche limite) à intérieure (R_i) et à l'extérieure (R_e). **On fait donc l'hypothèse conservatrice que R_i et $R_e \approx 0$ (worst case).** À titre d'exemples :

$$R_i = 1/(h_i \cdot S) \quad (8.43)$$

-hi- étant le coefficient d'échange thermique de l'eau interne en convection libre = $100 - 900 Wm^{-2}K^{-1}$

$$R_e = 1/(h_e \cdot S) \quad (8.44)$$

-he- étant le coefficient d'échange thermique de l'eau externe en convection libre et forcée due aux courants de circulation = $100 - 15'000 Wm^{-2}K^{-1}$

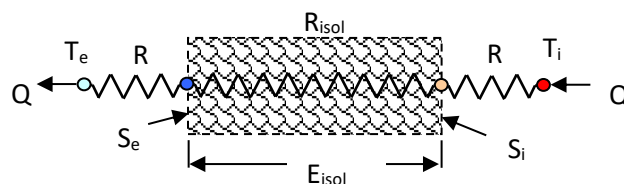


Figure 8.17 : Représentation du modèle simplifié thermique de l'enveloppe du Réservoir

8.6.2 Conductance des pavés isolants (verre cellulaire)

La conductance thermique d'un pavé (Ctp) est déterminée par sa conductivité thermique (λ_p : 0.05 W/mK), la surface (S) et l'épaisseur (ϵ : 0.05 m). FOAMGLASS propose deux formats standards de plaques en verre cellulaire (S_{-1} : 0.6 x 0.45 m = 0.27 m² et S_{-2} : 1.2 x 0.6 m = 0.72 m²) :

$$C_{tp-1} = S_{-1} (\lambda_p / \epsilon) = 0.27 (0.05/0.05) = 0.27 \quad [W/K] \quad (8.45)$$

$$C_{tp-2} = S_{-2} (\lambda_p / \epsilon) = 0.72 (0.05/0.05) = 0.72 \quad [W/K] \quad (8.46)$$

La Conductivité thermique surfacique des deux tailles de pavés (S_{-1} , S_{-2}) reste égale à 1 W/m²K.

Les joints intercalaires sont composés d'un matelas de feutres en fibre de verre E ou de basalte, d'une *masse volumique* (m) non compressée de 100 à 170 kg/m³ pour la fibre de verre et de 120 à 137 kg/m³ pour la fibre de basalte. Remplis d'air sec interstitiel, ces matériaux ont une faible conductivité thermique (λ_f : 0.03 à 0.038 W/mK) et sont utilisés notamment comme isolant thermique dans des applications à hautes températures (≈ 700 °C, source : *Final Advanced Materials*), performance qui n'est évidemment pas requise pour ULISSE.

Toutefois, immergé dans l'eau, l'espace interstitiel entre les fibres est rempli d'eau, dont la conductivité thermique SANS CONVECTION (λ_e : 0.58 W/mK à 10°C) est près de 30 fois supérieure à celle de l'air sec (λ_a : 0.02 W/mK). La structure ou la matrice en fibres a précisément pour fonction de réduire à l'intérieur la convection libre du « fluide isolant ou caloporteur » (air, gaz ou eau pour ce qui nous concerne) et ceci avec un minimum de masse structurelle (plus conductrice).

Il en va de même pour les matériaux isolants synthétiques (XPS, PSE, mousse phénolique, etc.) où l'espace libre dans la matrice est formé par l'expansion contrôlée de cavités ou de bulles enfermant le gaz, à l'instar du CO₂ produit par oxydation du carbone ajouté dans le bain de verre en fusion lors de la fabrication du verre cellulaire ... De cette manière, selon la masse volumique du verre cellulaire ainsi produit (100 à 200 kg/m³), la conductivité thermique (λ_{vc}) varie de 0.04 à 0.06 W/mK.

Selon la figure 8.14, le joint est coincé entre deux pavés, incliné entre eux sous l'angle α . Il a une largeur moyenne (l_j) de 1 cm (0.01 m) pour une hauteur (h_j) égale à l'épaisseur des pavés (ϵ_p : 0.05 m). Illustrée à la Fig. 8.18 ci-dessous, la longueur unitaire (L_{uj}) du joint correspond à la moitié de la circonférence d'un pavé. La longueur unitaire est alors fonction du format standard des pavés FOAMGLASS (S_{-1} , S_{-2}) :

$$\text{pour } S_{-1} (0.6 \times 0.45 \text{ m} = 0.27 \text{ m}^2) \quad L_{uj-1} = 0.6 + 0.45 \text{ m} = 1.05 \quad [m] \quad (8.47)$$

$$\text{pour } S_{-2} (1.2 \times 0.6 \text{ m} = 0.72 \text{ m}^2) \quad L_{uj-2} = 1.2 + 0.6 \text{ m} = 1.8 \quad [m] \quad (8.48)$$

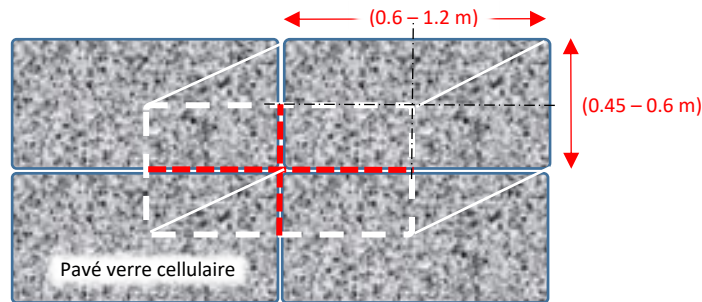


Figure 8.18 : Longueur unitaire du joint intercalaire (L_{uj}) égale à la moitié de la circonférence d'un pavé

La longueur surfacique du joint (L_{sj}) par m² de pavé n'est pas égale :

$$L_{sj-1} = L_{uj-a} / S_{-1} = 1.05 / 0.27 = 3.89 \quad [m/m^2] \quad (8.49)$$

$$L_{sj-2} = L_{uj-b} / S_{-2} = 1.8 / 0.72 = 2.5 \quad [m/m^2] \quad (8.50)$$

On observe que la longueur des joints diminue inversement avec la taille des pavés isolants.

Avec la largeur du joint intercalaire (l_j) de 1 cm (0.01 m), sa surface (S_j) est donc aussi fonction de la taille des pavés (S_{-1} , S_{-2}) :

$$S_{j-1} = L_{uj-a} \times 0.01 = 1.05 \times 0.01 \text{ m} = 0.0105 \quad [m^2] \quad (8.51)$$

$$S_{j-2} = L_{uj-b} \times 0.01 = 1.8 \times 0.01 \text{ m} = 0.018 \quad [m^2] \quad (8.52)$$

En fonction de la masse volumique (ρ) du feutre non compressé et celle propre au matériau de base, (ρ -verre : 2'500 kg/m³ et ρ -basalte : 3'140 kg/m³), la part (%) du volume « net » de verre (V_v) ou de basalte (V_b) et celle de l'eau dans le volume interstitiel du feutre, sont dans le rapport des masses volumiques respectives :

$$V_v = m_{vj} / \rho\text{-verre} = (100 \text{ à } 170) / 2'500 = 0.04 \text{ à } 0.07 \quad 4 \text{ à } 7 \quad [\%] \quad (8.53)$$

$$V_b = m_{bj} / \rho\text{-basalte} = (120 \text{ à } 137) / 3'140 \approx 0.04 \quad \approx 4 \quad [\%] \quad (8.54)$$

Ainsi l'eau présente dans les interstices du feutre, non compressé, représente en moyenne à 95 % du volume total du joint intercalaire.

Pour maintenir l'écartement entre les pavés en verre cellulaire, **le feutre non compressé n'offre que peu de résistance à la compression**. Cette résistance peut être augmentée en comprimant le feutre, par exemple d'un facteur 5, ce qui ramène le ratio des volumes de fibres et d'eau à environ 1/4. La masse volumique du joint en feutre (compressé) est alors de 500 à 850 kg/m³ pour la fibre de verre et de 600 à 685 kg/m³ pour la fibre de basalte.

La surface du joint intercalaire compressé (S_{jc}), qui est fonction de la taille des pavés (S_{-1} , S_{-2}), est donc subdivisée en un 1/4 de la surface ($5 \times 4\% = 25\%$) pour les fibres (S_f) et 3/4 pour l'eau interstitielle (S_e).

Pour les fibres, selon la taille des pavés, on a :

$$S_{f-1} = 1/4 S_j = 1/4 \times 0.0105 = 0.0026 \quad [m^2] \quad (8.55)$$

$$S_{f-2} = 1/4 S_j = 1/4 \times 0.018 = 0.0045 \quad [m^2] \quad (8.56)$$

De même pour l'eau on a respectivement :

$$S_{e-1} = 1/4 S_j = 3/4 \times 0.0105 = 0.0079 \quad [m^2] \quad (8.57)$$

$$S_{e-2} = 1/4 S_j = 3/4 \times 0.018 = 0.0135 \quad [m^2] \quad (8.58)$$

La conductance thermique du faisceau de fibres seules (C_{tf}) est théoriquement fonction de leur section totale (S_{f-1} , S_{f-2}), de l'épaisseur du joint (ϵ_j : 0.05 m) et celle de la conductivité thermique propre du matériau (verre λ_v : 0.81 W/mK et basalte λ_b : 1.7 W/mK).

Pour le verre, selon la taille des pavés, on a :

$$C_{tv-1} = S_{f-1} (\lambda_v / \epsilon_f) = 0.0026 (0.81 / 0.05) = 0.042 \quad [W/K] \quad (8.59)$$

$$C_{tv-2} = S_{f-2} (\lambda_v / \epsilon_f) = 0.0045 (0.81 / 0.05) = 0.073 \quad [W/K] \quad (8.60)$$

Pour le basalte on a respectivement :

$$C_{tb-1} = S_{f-1} (\lambda_b / \epsilon_f) = 0.0026 (1.7 / 0.05) = 0.088 \quad [W/K] \quad (8.61)$$

$$C_{tb-2} = S_{f-2} (\lambda_b / \epsilon_f) = 0.0045 (1.7 / 0.05) = 0.153 \quad [W/K] \quad (8.62)$$

De la même manière, la conductance thermique de l'eau seule (C_{te}) dans les l'interstices du joint est théoriquement fonction de la section de passage ($S_{e-1/-2}$), de l'épaisseur du joint (ϵ_j = 0.05 m) et celle de la conductivité thermique de l'eau non convective (λ_e : 0.58 W/mK à 10°C) :

$$C_{te-1} = S_{e-1} (\lambda_e / \epsilon_e) = 0.0079 (0.58 / 0.05) = 0.092 \quad [W/K] \quad (8.63)$$

$$C_{te-2} = S_{e-2} (\lambda_e / \epsilon_e) = 0.0135 (0.58 / 0.05) = 0.157 \quad [W/K] \quad (8.64)$$

La Conductance thermique du joint intercalaire comprimé et immergé (C_{tj}) est alors, en première approximation, la somme de la C_{tf} des fibres et celle de l'eau interstitielle non convective (C_{te}) :

$$C_{tj} = C_{tf} + C_{te} \quad [W/K] \quad (8.65)$$

Respectivement en fonction des matériaux et de leurs surfaces respectives, on obtient :

$$C_{tjv-1} = C_{tv-1} + C_{te-1} = 0.042 + 0.092 = 0.134 \quad [W/K] \quad (8.66)$$

$$C_{tjv-2} = C_{tv-2} + C_{te-2} = 0.073 + 0.157 = 0.23 \quad [W/K] \quad (8.67)$$

$$C_{tjb-1} = C_{tb-1} + C_{te-1} = 0.088 + 0.092 = 0.18 \quad [W/K] \quad (8.68)$$

$$C_{tjb-2} = C_{tb-2} + C_{te-2} = 0.153 + 0.157 = 0.31 \quad [W/K] \quad (8.69)$$

Dans la fibre de verre, compressée et immergée, l'eau interstitielle représente 69 % du C_{tj} et 51% dans la fibre de basalte.

La conductivité thermique du feutre compressé et immergé (λ_f), selon le modèle simplifié, est bien logiquement en fonction de la matière des fibres (verre, basalte):

$$\lambda_{fv-1} = Ctj-1 * \epsilon_e / S_{j-1} = 0.134 * 0.05 / 0.0105 = 0.64 \quad [W/mK] \quad (8.70)$$

$$\lambda_{fv-2} = Ctj-2 * \epsilon_e / S_{j-2} = 0.23 * 0.05 / 0.018 = 0.64 \quad [W/mK] \quad (8.71)$$

$$\lambda_{fb-1} = Ctj-1 * \epsilon_e / S_{j-1} = 0.18 * 0.05 / 0.0105 = 0.86 \quad [W/mK] \quad (8.72)$$

$$\lambda_{fb-2} = Ctj-2 * \epsilon_e / S_{j-2} = 0.31 * 0.05 / 0.018 = 0.86 \quad [W/mK] \quad (8.73)$$

avec (8.51) pour $S_{j-1} = 0.0105 \text{ m}^2$

avec (8.52) pour $S_{j-2} = 0.018 \text{ m}^2$

C'est 19 à 25 fois la valeur du feutre sec ($\lambda_f \approx 0.034 \text{ W/mk}$) et 13 à 17 fois celui des pavés en verre cellulaire ($\lambda_{vc} \approx 0.05 \text{ W/mk}$), ce qui constitue un véritable « pont » pour la déperdition thermique !

Toutefois, on a considéré ici (de façon simplifiée) que le joint est constitué de deux résistances ou conductances thermiques distinctes, parallèles ; l'une solide en fibres et l'autre liquide en eau. Similaire à un circuit électrique à deux résistances en parallèles, les flux de chaleurs respectifs y sont continus et ne s'interfèrent pas. Leurs conductivités thermiques propres et cumulées ($Ctf + Cte = Ctj$) y sont alors probablement surestimées.

En réalité les résistances thermiques sont intimement entrelacées, déformées (discontinues) et les flux de chaleur résultant perturbés, ce qui réduit en conséquence la conductance thermique réelle du joint ($Ctjr$). Ceci similaire à la capacité de circulation d'une autoroute comparativement à celle d'une surface pourtant égale de routes secondaires mais truffées d'obstacles (feux, carrefours, ralentisseurs, etc.) ...

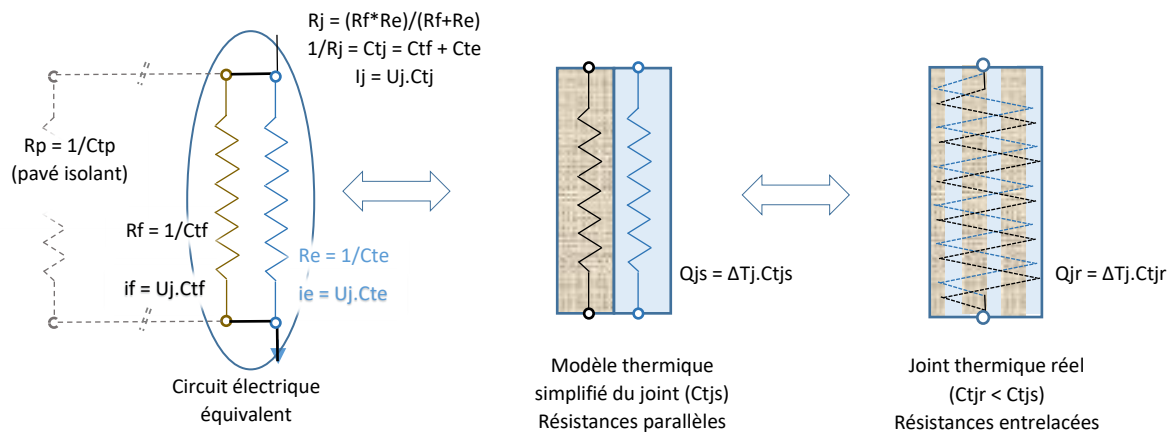


Fig. 8.19 : Circuit électrique équivalent du modèle thermique simplifié et réel du joint intercalaire

Pour vérifier cette surestimation du Ctj , on peut appliquer le modèle simplifié à la conductance thermique du joint en fibre de verre ($Ctjv-m$), non compressé et sec, rempli d'air ($\lambda_a : 0.022 \text{ W/mK}$). Ceci à l'aide de la surface du joint S_{j-1} (éq. 8.51) et le ratio entre le volume de verre V_v (éq. 8.53) et de l'eau V_a ($1 - V_v$).

$$\text{Avec la surface de fibre : } Sf-1 = S_{j-1} * V_v = 0.0105 * 0.04 = 0.00042 \text{ [m}^2\text{]} \quad (8.74)$$

$$\text{la surface de l'air : } Sa-1 = S_{j-1} * V_a = 0.0105 * 0.96 = 0.01008 \text{ [m}^2\text{]} \quad (8.75)$$

et selon (8.66), on obtient le $Ctjv-m$ du (-m)odèle simplifié:

$$Ctjv-m = Ctv + Cta = Sf-1 (\lambda_v / \epsilon_f) + Sa-1 (\lambda_a / \epsilon_a) = 0.0108 \quad [W/K] \quad (8.76)$$

Comparativement, avec la conductivité thermique du feutre en fibres de verre et de basalte, sec et non compressé ($\lambda_f : 0.03 \text{ à } 0.038 \approx 0.034 \text{ W/mk}$), la conductance thermique (-r)éelle du joint $Ctjv-r$:

$$Ctjv-r = Sf-1 (\lambda_f / \epsilon_f) = 0.0105 * 0.034 / 0.05 = 0.00714 \quad [W/K] \quad (8.77)$$

La Conductance thermique « réelle » est comparativement inférieure à 1/3 de celle obtenue selon le calcul du modèle simplifié ($C_{tjv-r} / C_{tjv-m} = 0.66$). On peut donc affecter un **facteur correctif** ($F_c = 0.66$) pour s'approcher du comportement physique réel du matériau isolant **lié à l'entrelacement intime des fibres avec l'air interstitiel**.

À ce titre, on peut considérer que le calcul, selon le modèle simplifié, de la conductivité thermique (réelle) du feutre, compressé et immergé (λ_{fr}), respectivement pour la fibre de (v)erre et de (b)asalte, peut dès lors également être affectée du facteur correctif (F_c) :

$$\text{pour le verre (avec 8.70) : } \lambda_{fr-v} = \lambda_{f-v} * F_c = 0.64 * 0.66 = 0.42 \quad [W/mK] \quad (8.78)$$

$$\text{pour le basalte (avec 8.30) : } \lambda_{fr-b} = \lambda_{f-b} * F_c = 0.86 * 0.66 = 0.57 \quad [W/mK] \quad (8.79)$$

De même, la **conductance thermique du joint intercalaire** (C_{tj}), « unitaire » (par pavé), en fibre de (v)erre ou de (b)asalte et immergé dans l'eau, peut également être affectée du facteur correctif (F_c) :

$$C_{tjr} = C_{tjm} * F_c \quad [W/K] \quad (8.80)$$

$$C_{tjr-1v} = 0.134 * 0.66 = 0.088 \quad [W/K] \quad (8.81)$$

$$C_{tjr-2v} = 0.23 * 0.66 = 0.152 \quad [W/K] \quad (8.82)$$

$$C_{tjr-1b} = 0.18 * 0.66 = 0.119 \quad [W/K] \quad (8.83)$$

$$C_{tjr-2b} = 0.31 * 0.66 = 0.205 \quad [W/K] \quad (8.84)$$

La conductance thermique cumulée (C_{tp+j}), du pavé (C_{tp}) avec la part du joint intercalaire réel (C_{tjr}), affecté du facteur correctif (F_c), dépend alors aussi de la taille du pavé (S_{-1} , S_{-2}) et de la matière du joint en (v)erre ou en (b)asalte :

$$C_{tp+j} = C_{tp} + C_{tjr} \quad [W/K] \quad (8.85)$$

$$\text{avec (9.3) pour } C_{tp-1} : C_{tp+j-1v} = C_{tp-1} + C_{tjr-1v} = 0.27 + 0.088 = 0.358 \quad [W/K] \quad (+33\%) \quad (8.86)$$

$$\text{avec (9.4) pour } C_{tp-2} : C_{tp+j-2v} = C_{tp-2} + C_{tjr-2v} = 0.72 + 0.152 = 0.872 \quad [W/K] \quad (+21\%) \quad (8.87)$$

$$C_{tp+j-1b} = C_{tp-1} + C_{tjr-1b} = 0.27 + 0.119 = 0.389 \quad [W/K] \quad (+44\%) \quad (8.88)$$

$$C_{tp+j-2b} = C_{tp-2} + C_{tjr-2b} = 0.72 + 0.205 = 0.925 \quad [W/K] \quad (+28\%) \quad (8.89)$$

On observe que la conductance thermique de l'enveloppe, avec le pont thermique des joints intercalaires (C_{tp+j}) et par rapport au pavé seule, **augmente de 21 à 44 %, en fonction de la taille des pavés (-2 ; -1) et la largeur (1cm) des joints en (v)erre ou en (b)asalte**. Avec une double largeur des joints (2 cm), la conductance de l'enveloppe (C_{tp+j}) augmente respectivement de **42 et 88 %** et avec elle la déperdition thermique de l'enveloppe.

Remarque : Dans le calcul de la conductance thermique de l'enveloppe, **on a délibérément négligé l'effet isolant** de la double nappe en feutre de verre ou de basalte **de l'enrobage (manteau) anti-abrasion des pavés en verre cellulaire (§ 8.4.7)**.

8.6.3 Conductance thermique linéique de la zone de jonction des bandes de l'enveloppe (C_{tjon})

Outre la résistance ou la conductance thermique des pavés associée aux joints intercalaires, la jonction des bandes de l'enveloppe constitue un *pont thermique « linéique »* (par mètre de longueur). Les mâchoires de liaison (acier inoxydable) sont couvertes d'un manteau d'isolation thermique qui est constitué de plusieurs couches de feutre en fibre de verre ou de basalte.

Pour déterminer la *résistance thermique linéique* (R_{tL}) ou à l'inverse la *conductance thermique linéique* (C_{tL}), la zone de jonction est divisée en ses différents éléments constitutifs, caractérisés par la largeur (L), l'épaisseur (ϵ) et la conductivité thermique (λ) propre au matériau de chaque élément.

Tel que représenté à la Fig. 8.20 ci-dessous, ces différents éléments sont juxtaposés en largeur ($B//A//B'$) et empilés dans l'épaisseur ($C + D + E$), similaire à un circuit de résistances électriques.

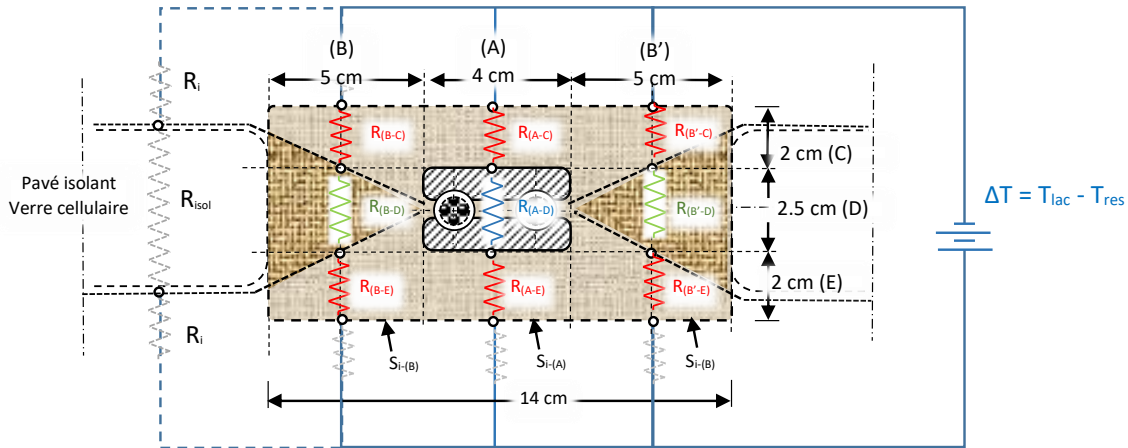


Figure 8.20 : Coupe transversale de la zone de jonction des bandes de l'enveloppe et son circuit thermique équivalent

La résistance thermique linéique (R_{tL}) équivalente est la suivante :

$$R_{tL} : R_B // R_A // R_{B'} \Rightarrow R_{tL} = \frac{1}{[C_B + C_A + C_{B'}]} = \frac{1}{\left[\frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_{B'}}\right]} \\ = \frac{1}{\left[\frac{1}{(R_{B-C} + R_{B-D} + R_{B-E})} + \left(\frac{1}{(R_{A-C} + R_{A-D} + R_{A-E})}\right) + \frac{1}{(R_{B'-C} + R_{B'-D} + R_{B'-E})}\right]} \quad (8.90)$$

Remarque : pour alléger l'écriture, on a supprimé ici l'indice « t_L » dans la dénomination des éléments.

La zone de jonction des bandes étant symétrique, dans la largeur B/A/B et dans l'épaisseur C/D/E=C), les résistances R_B et $R_{B'}$ sont identiques et constituées de trois couches (C/D/E) de feutre ($\lambda_f \approx 0.5 \text{ W/mK}$).

Selon (8.78 et 8.79), la conductivité thermique du **feutre, compressé et immergé**, en fibre de verre ($\lambda_{f-v} : 0.42 \text{ W/mK}$), et en fibre de basalte ($\lambda_{f-b} : 0.57 \text{ W/mK}$), est en moyenne 0.5 W/mK . C'est 10 x celle des pavés en verre cellulaire ($\lambda_{vc} : 0.05 \text{ W/mK}$).

Pour simplifier on homogénéise les trois couches de feutre, dont les résistances R_B et $R_{B'}$, pour former qu'une seule résistance équivalente $R_{B-B'}$. Ceci, sur l'épaisseur $\epsilon_{C-D-E} = 0.065 \text{ m}$, la largeur $2L_B = 0.1 \text{ m}$, et sur une longueur de 1 m (linéique), la surface $2S_B = 0.1 \text{ m}^2$; ce qui donne pour $R_{B-B'}$ et sa conductance inverse $C_{B-B'}$:

$$R_{B-B'} = \epsilon_{C-D-E} / 2S_b * \lambda_f = 0.065 / 0.1 * 0.5 = 1.3 \quad [\text{K/W}] \quad (8.91)$$

$$C_{B-B'} = 1 / R_{B-B'} = 0.77 \quad [\text{W/K}] \quad (8.92)$$

R_A est constituée au centre de la résistance de la mâchoire de liaison (R_{AD}), en acier inoxydable ($\lambda_{inox} : 14 \text{ W/mK}$) et qui est couverte de chaque côté (C, E) d'une même couche de feutre ($R_{A-C} = R_{A-E}$). La résistance équivalente R_A et sa conductance inverse sont alors les suivantes :

$$R_A = R_{A-C} + R_{A-D} + R_{A-E} = 2 * (\epsilon_{C/E} / S_A * \lambda_f) + (\epsilon_D / S_A * \lambda_{inox}) \quad (8.93)$$

$$= 2 * (0.02 / 0.04 * 0.5) + (0.025 / 0.04 * 14) = 1.04 \quad [\text{K/W}] \quad (8.94)$$

$$C_A = 1 / R_A = 0.96 \quad [\text{W/K}] \quad (8.95)$$

La résistance thermique *linéique* (par m linéaire) de la zone de jonction des bandes de l'enveloppe (R_{tL}) est donc constituée des résistances en parallèles $R_{B-B'}$ et R_A , soit à l'inverse (C_{tL}) la somme de leurs conductances thermiques correspondantes $C_{B-B'}$ et C_A :

$$R_{tL} : R_{B-B'} // R_A \Rightarrow R_{tL} = 1 / (C_{B-B'} + C_A) = 1 / (0.77 + 0.96) = 0.58 \quad [\text{K/W}] \quad (8.96)$$

$$C_{tL} = C_{B-B'} + C_A = 0.77 + 0.96 = 1.73 \quad [\text{W/K}] \quad (8.97)$$

Pour mémoire, R_{tL} est la résistance - ou C_{tL} est la conductance - thermique *linéique* (par m linéaire) de la zone de jonction. La longueur d'une jonction (Lojo), entre les bandes de l'enveloppe, est de 157 m (arche hyperbolique $L_{oh} = \pi R_c$, éq.8.6).

La résistance thermique de la zone de jonction (R_{tjon}) ainsi que la conductance sont alors les suivantes :

$$R_{tjon} = R_{tL} / L_{jon} = 0.58 / 157 = 0.0037 \text{ [K/W]} \quad (8.98)$$

$$C_{tjon} = C_{tL} * L_{jon} = 1.73 * 157 = 272 \text{ [W/K]} \quad (8.99)$$

Avec une largeur de la zone de jonction (L_{jon}) de 0.14 m, la surface est de 22 m² (S_{jon}). La résistance thermique *surfactive* (par m²) de la zone de jonction (R_{tjons}) ainsi que la conductance sont alors les suivantes :

$$R_{tjons} = R_{tjon} * S_{jon} = 0.0037 * 22 = 0.081 \text{ [K/W]} \quad (8.100)$$

$$C_{tjons} = C_{tjon} / S_{jon} = 272 / 22 = 12.35 \text{ [W/K]} \quad (8.101)$$

Les bandes parallèles de l'enveloppe (dans la partie rectiligne du Réservoir), large de 12 m ont une surface de 1884 m² ($S_{be} = 12 \times 157 \text{ m}$), comprenant les pavés en verre cellulaire, les joints intercalaires en feutre de verre ou de basalte et les mâchoires de jonction.

Une bande comprend N pavés selon leur taille (S_{-1} , S_{-2}) avec l'épaisseur du joint intercalaire (0.01 m) :

$$S_{-1} (0.61 \times 0.451 \text{ m} = 0.275 \text{ m}^2) \Rightarrow N_{-1} = 1884 / 0.275 = 6'851 \text{ [-]} \quad (8.102)$$

$$S_{-2} (1.21 \times 0.61 \text{ m} = 0.738 \text{ m}^2) \Rightarrow N_{-2} = 1884 / 0.738 = 2'553 \text{ [-]} \quad (8.103)$$

La conductance thermique d'une bande d'enveloppe (C_{tbe}) est alors la somme de la conductance thermique des (N) pavés avec leurs joint intercalaires (C_{tp+j}) et celle de la zone de jonction (C_{tjo}) :

$$C_{tbe} = (N * C_{tp+j}) + C_{tjo} \quad (8.104)$$

Selon la taille et le Nombre (N) des pavés (9.60 ; 9.61) et le type de feutre (verre, basalte), on obtient avec (9.44/45/46/47 pour le C_{tp+j} et 9.57 pour la C_{tjo}) :

$$C_{tbe-1v} = (6'851 * 0.358) + 272 = 2'453 + 272 = 2'725 \text{ [W/K]} \quad (8.105)$$

$$C_{tbe-2v} = (2'553 * 0.872) + 272 = 2'226 + 272 = 2'498 \text{ [W/K]} \quad (8.106)$$

$$C_{tbe-1b} = (6'851 * 0.389) + 272 = 2'665 + 272 = 2'937 \text{ [W/K]} \quad (8.107)$$

$$C_{tbe-2b} = (2'553 * 0.925) + 272 = 2'361 + 272 = 2'633 \text{ [W/K]} \quad (8.108)$$

On observe que la Conductance thermique des jonctions (C_{tjon}) représente environ 10 % de la conductance thermique totale de l'enveloppe.

Avec les C_t des pavés, des joints intercalaires (épais. 1 cm) et de la jonction de la bande, on déduit la conductivité thermique de l'enveloppe (λ_{env}), par exemple, pour le grand format de pavés et la fibre de verre (-2v) :

$$\lambda_{env-2v} = C_{tbe-2v} * \epsilon / S_{be} = 2'498 * 0.05 / 1884 = 0.066 \text{ [W/mK]} \quad (8.109)$$

8.6.4 Utilisation de la conductivité thermique de l'enveloppe :

Cette valeur (8.109) de la conductivité thermique de l'enveloppe ($\lambda_{env} = 0.066 \text{ [W/mK]}$) permet de calculer le **Facteur d'échelle temporelle Réservoir vs Maquette** [§ 18, (16.2)] ainsi que de calculer (théoriquement) la **déperdition thermique de l'enveloppe** de la Maquette expérimentale à échelle réduite (0.077 m³) et celle du Réservoir type d'ULISSE en grandeur réelle (2 10⁶ m³).

Les calculs théoriques de la déperdition thermique sont conduits pour les phases représentatives du fonctionnement annuel (cycle) du Réservoir et selon deux approches.

L'un des calculs est réalisé, en « valeurs moyennes » du gradient de température, sur la surface « active » de l'enveloppe :

- Spécifiquement, pour la Phase de *Stagnation Automnale* (SA), la surface « active » de l'enveloppe et le volume correspondent à la totalité du Réservoir et restent par définition constantes,
- Pour les phases de *Chargement Estival* (CE) et de *Déchargement Hivernal* (DH), le calcul en « valeurs moyennes » est réalisé sur le volume moyen « mi-volume » du Réservoir.

L'autre approche du calcul théorique est réalisée, pour les phases CE et DH, par « intégration » des différents « pas » (de volumes distincts) qui varient constamment durant lesdites phases.

9 Maquette d'essais du Réservoir ULISSE

9.1 Agencement général de la Maquette

La Maquette permet de reproduire les différentes phases de fonctionnement du Réservoir ULISSE pour analyser et établir l'efficacité de son système de stockage saisonnier sous-lacustre d'énergie-chaleur. La phase de *Stagnation Automnale* (SA) permet d'établir la *Perte Thermique de Stagnation* (PTS) et la caractéristique *Constante de temps du refroidissement* (Ctr). Par ailleurs, la Maquette permet aussi de reproduire et de mesurer les flux d'échanges de chaleur, lors des phases « dynamiques », du *Chargement Estival* (CE) d'eau tempérée et du *Déchargement Hivernal* (DH).

La Maquette d'essais représente une « tranche linéique » (1/5) de l'enveloppe du Réservoir, à une échelle réduite de 1/175^{em}. Aux deux extrémités longitudinales, l'enveloppe est « fortement isolée » (parois pseudo athermanes) par une plaque en polystyrène extrudé de 4 cm d'épaisseur ($\lambda \approx 0.035 \text{ W/m K}$, $\Rightarrow U \approx 0.9 \text{ W/m}^2\text{K}$).

L'enveloppe hyperbolique de la Maquette est réduite à une feuille mince (2 mm) et transparente en polycarbonate ($\lambda \approx 0.21 \text{ W/m K}$, $\Rightarrow U = 105 \text{ W/m}^2\text{K}$). Cette feuille (62 x 90 cm = 5'580 cm²) est courbée dans sa grande dimension (90 cm) et est fixée à la base entre deux tiges filetées en acier inoxydable (M6) espacées de 57 cm et une troisième située au sommet. Deux autres tiges filetées M5 sont encore placées à mi-hauteur. Ces tiges filetées servent à maintenir l'enveloppe entre les deux plaques isolantes d'extrémités. La courbure résultante étant proche de l'hyperbole d'un rayon moyen de 30 cm (28.5 à la base et 31.3 au sommet), ce qui donne une section transversale (axes x, y) de 1'238 cm² ($\approx 97\%$ du demi-arc de cercle équivalent). Entre les plaques d'extrémités, la longueur de l'enveloppe étant de 62 cm (axe z), **le volume correspondant de la Maquette est de 77 litres.**

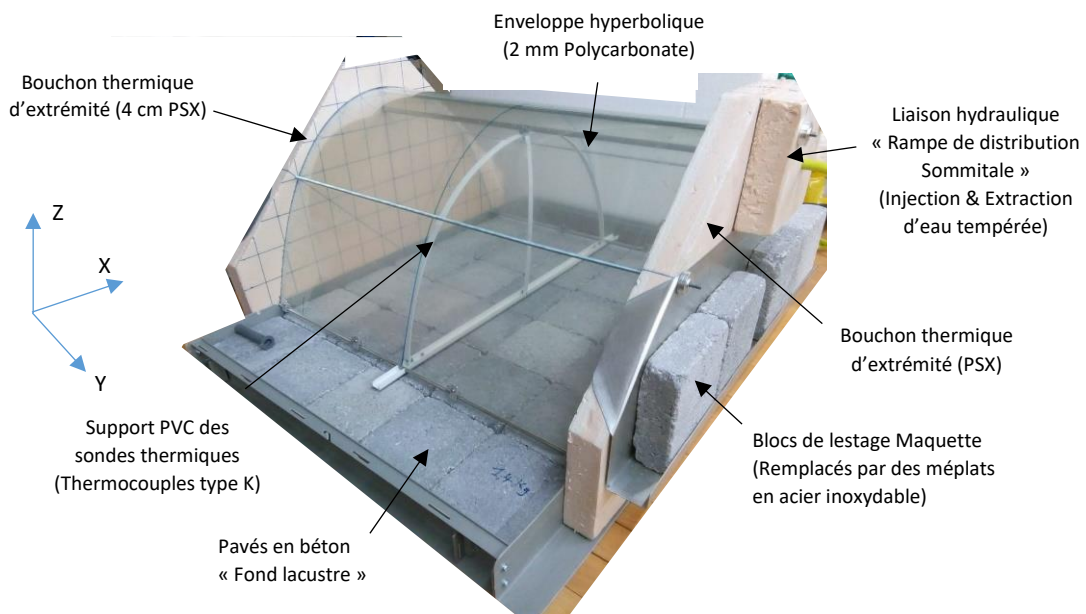


Figure 9.1 : Maquette d'essais du Réservoir ULISSE

Compte tenu de la surface des plaques d'extrémités et celle de l'enveloppe courbée ainsi que de leur conductivité thermique propre, **le flux « transversal » (x, y) de chaleur spécifique (\emptyset) de l'enveloppe est 236 fois supérieur à celui des extrémités** : $\emptyset_{\text{env}} = 59 \text{ W/K}$ et $\emptyset_{\text{ext}} = 0.25 \text{ W/K}$ (bouchons thermiques).

En première approximation, ceci permet de négliger la déperdition thermique longitudinale de la Maquette et de mettre en évidence la prédominance de la déperdition thermique transversale de l'enveloppe, y compris celle par le fond lacustre ainsi que la convection libre qui tend à réduire la stratification interne, conduisant aux pertes Exergétiques.

La Maquette est placée dans une cuve IBC en plastique avec armature de 1'000 litres, fixée sur une palette en plastique (120 x 100 cm). Le ratio entre le volume d'eau dans la Cuve IBC et la Maquette est au maximum de 12.

Pour l'introduction de la Maquette, une ouverture rectangulaire (100 x 80 cm) est faite au sommet de la Cuve. La Maquette est maintenue sur le fond de la Cuve (contre la poussée d'Archimède des plaques d'extrémités en PSX), par un lestage fait de 4 méplats en acier inoxydable (10 kg brut de récupération) et par l'appui de deux tiges réglables de retenue depuis la structure de la Cuve. L'ouverture inférieure de la Maquette est posée sur deux couches de pavés en béton (épaisseur totale 8 cm) reproduisant la conductibilité et la capacité thermique du fond lacustre.

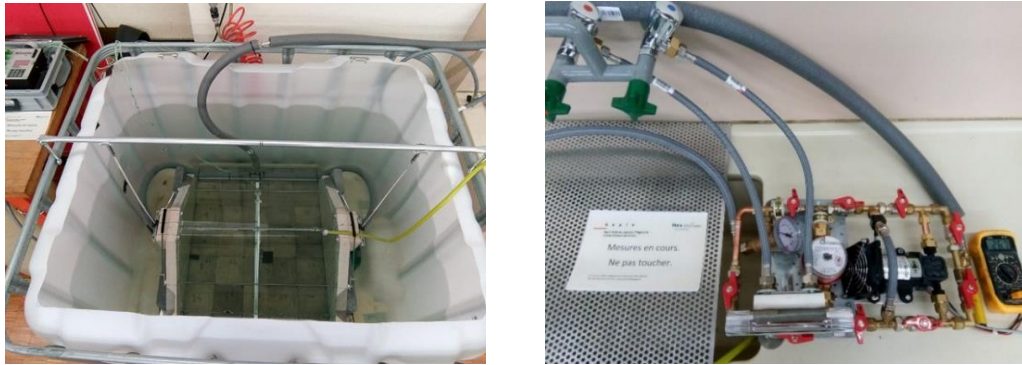


Fig. 9.2 & 9.3 : Maquette ULISSE dans la cuve d'essais reliée à la platine d'alimentation hydrothermique

La cuve est située dans un local au sous-sol de l'HEPIA (B I 23, anciennement « atelier bois »). La Cuve n'est pas isolée et en équilibre thermique avec le local. Pour réduire l'influence de la température du local, on peut la couvrir d'une isolation thermique (p.ex. 10 cm de laine de verre). Sa stabilité thermique dépend du transfert de chaleur de la Maquette vers la cuve (Q_{m-c}) et vers la dalle du fond (Q_{m-f}), ainsi que celui de la cuve vers le local (Q_{c-l}). La Cuve est encore munie d'une arrivée d'eau en surface et d'une extraction inférieure par débordement à niveau constant, ce qui permet au besoin de réguler la température à l'intérieur.

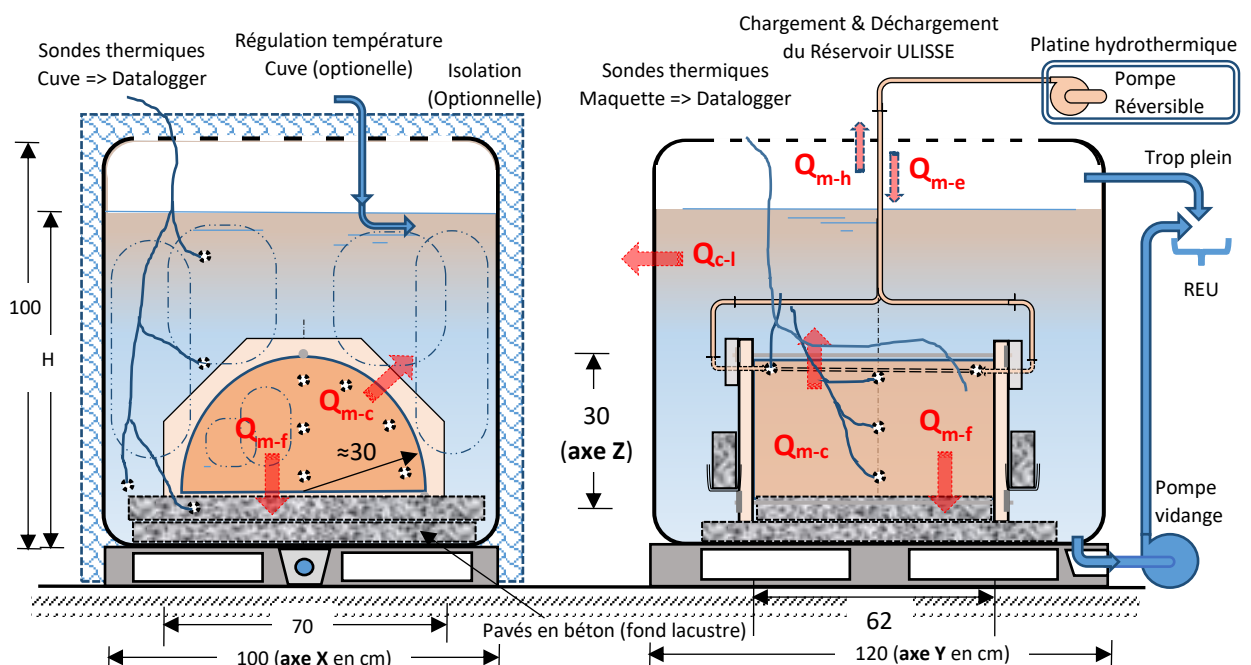


Figure 9.4 : Schéma des essais thermiques sur la Maquette d'un élément de Réservoir d'ULISSE (échelle 1/175^{em})

La température de l'eau dans un Réservoir réel type ULISSE est à priori d'environ 20°C alors que celle au fond du lac à 5°C, soit un écart de 15°K. **Les expériences sur la Maquette sont faites avec une alimentation depuis le réseau d'Eau Chaude Sanitaire (ECS) et d'Eau froide (EFS).** La température est régulée par un mitigeur de douche

classique et d'un Réservoir de Stabilisation Thermique (RST) intermédiaire. Par exemple, avec une différence de température de 15°K et compte tenu du rapport entre les volumes d'eau entre la Maquette et la Cuve IBC, la température de la Cuve peut augmenter progressivement d'environ 1°K si elle est isolée et non refroidie.

9.2 Platine d'alimentation hydraulique de la Maquette

Le chargement et le déchargement thermique de la Maquette sont réalisés par l'intermédiaire d'une **platine d'alimentation hydrothermique (PAH)**, comportant une **pompe à membrane (PM)** réversible par le jeu d'ouverture/fermeture des vannes d'orientation (VO) de la circulation d'eau vers et depuis la Maquette. La pompe à membrane est alimentée par une alimentation stabilisée pour un réglage fin.

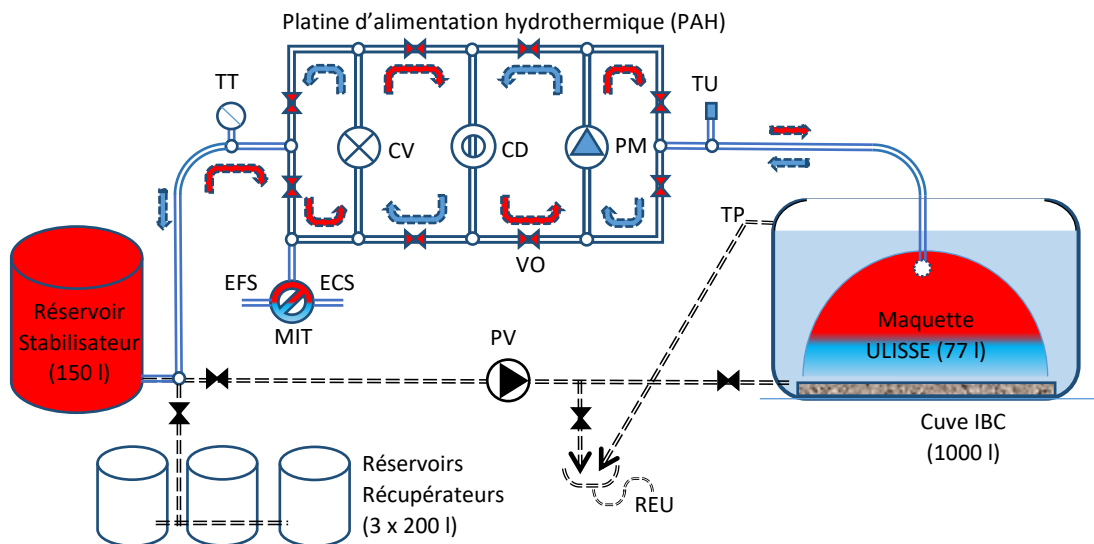


Figure 9.5 : Schéma hydraulique de la Maquette d'ULISSE
(sens de circulation : **flèche - rouge = chargement** / **flèche - bleu = déchargement thermique**)

CV :	Compteur Volumétrique à jet unique eau chaude sanitaire (pré-équipé capteur d'impulsions)
CD :	compteur de débit 0.1-2 L/min (Teckflow, IR-OPFLOW)
EFS :	Eau Froide Sanitaire
ECS :	Eau Chaude Sanitaire
IBC:	Intermediate bulk container (ou GRV grand récipient pour vrac)
MIT :	Mitigeur de température ECS/EFS (pré-chargement thermique du Réservoir tampon)
REU :	Réseau d'Eau Usée
RR :	Réservoir de récupération de l'eau de la cuve
RS :	Réservoir de Stabilisation Thermique intermédiaire.
PAH :	Platine d'alimentation hydrothermique
PV :	Pompe centrifuge de Vidange, FLOTEC BIOX
PM :	Pompe à Membrane (chargement/déchargement thermique Maquette), 12V, 36W
TP :	Trop-Plein Cuve => REU
TT :	Thermomètre d'alimentation (stabilisateur de Température de chargement Maquette)
TU :	Sonde de température à thermocouple d'alimentation Maquette ULISSE
VO :	Vannes d'orientation de la circulation d'eau.

Tableau 9.6 : Abréviations des éléments de la platine d'alimentation hydrothermique

La Maquette est munie dans sa partie sommitale d'une **rampe d'injection et d'extraction de l'eau tempérée** (Fig. 9.7), permettant de reproduire le **Chargement Estival (CE)** d'énergie-chaleur ($Q_{m-e} = 5.3 \text{ MJ}$ ou 1.47 kWh @ $\Delta T = 15^\circ\text{K}$) et le **Déchargement Hivernal (DH)** (Q_{m-h}).

Les différents débits d'eau sont assurés par la pompe à membrane (PM) qui est raccordée aux deux extrémités de la rampe, constituée d'un tube en laiton d'un diamètre intérieur/extérieur de 6/8 mm et munie de 24 petits trous (\varnothing 2 mm), diamétralement opposés sur deux rangées et à inter-distances décroissantes (de 1 cm) vers le centre du tube. Une **grille de répartition du flux d'eau**, munie d'une nappe en fibre de verre, est placée directement sous ladite rampe (Figures 9.7 ci-dessous).

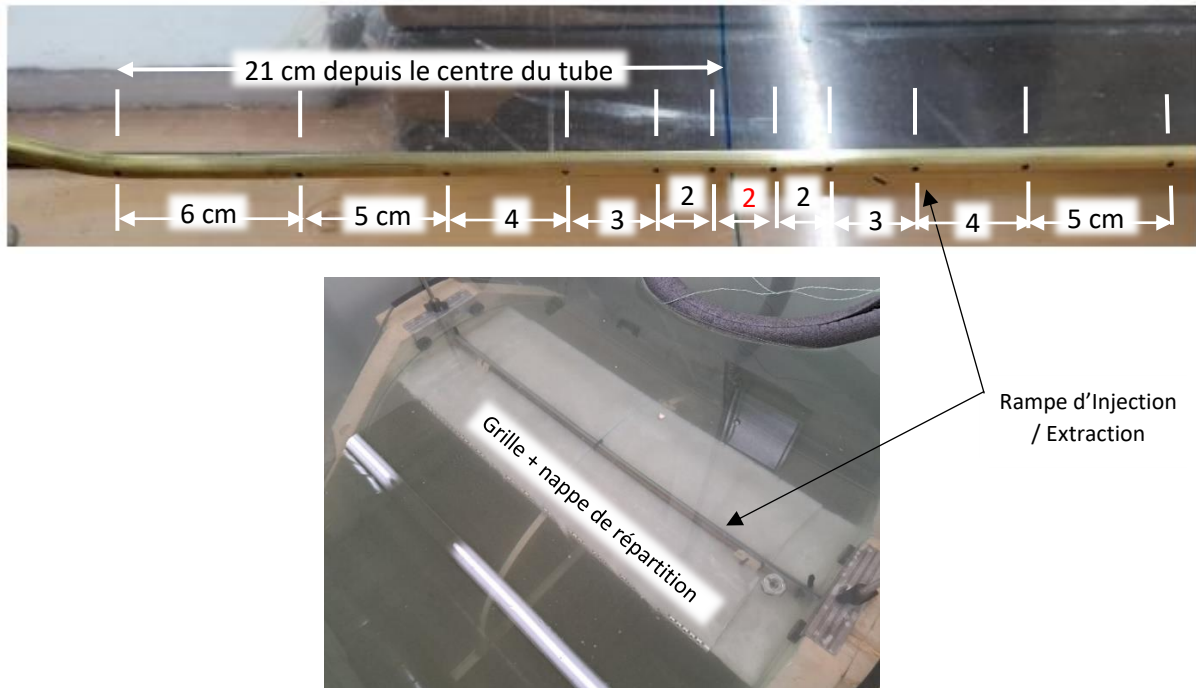


Figure 9.7 : Rampe sommitale d'injection estivale (Q_{m-e}) et d'extraction hivernale (Q_{m-h}) avec une grille de répartition du flux d'eau tempérée

9.3 Thermocouples de mesures des températures

À chaque extrémité de la rampe est fixée une sonde de température (thermocouple type K, TC9/10)). Les conduites de liaison sont isolées de l'influence de la température de l'eau dans la cuve par un manchonnage en mousse. Les mesures de la température et du débit d'eau au niveau de la rampe permettent de quantifier l'énergie-chaleur introduite (Q_{m-e}) et extraite (Q_{m-h}) de la Maquette sur un cycle complet (pseudo annuel).

Les mesures sont principalement d'ordre thermique permettant de connaître la température et aussi d'en déduire indirectement les mouvements convectifs d'eau dans la Maquette ainsi que ceux dans la Cuve IBC d'essais (représentant le lac).



Fig. 9.8 : thermocouples type K



Fig. 9.9 : Support transversal des thermocouples

Les sondes de température (thermocouples type K, Fig. 9.8) sont placées dans la Maquette sur un **Support transversal** en PVC qui est déplaçable longitudinalement (Fig. 9.9) ainsi que sur la **Rampe sommitale** de distribution/extraction d'eau.

Neuf (9) thermocouples (TC) sont placés, par paires, à des hauteurs différentes sur le support transversal ; l'un sur l'axe central et l'autre sur le bord latéral du support ainsi que deux (TC9/10) latéralement (en position ou extrémité opposée) sur la rampe sommitale :

Emplacement	Support	Support	Support	Support	Support	Rampe
Position/Hauteur	3 cm	8 cm	16 cm	23 cm	28 cm	30 cm
Centrale	TC11-B (T8)	TC12 (T12)	TC13 (T13)	TC14 (T14)	TC8 (T1')	-
Latérale	TC11-A (T11)	TC15 (T5)	TC15 (T5)	TC17 (T7)	-	TC9 (T9) & TC10 (T10)

Tableau 9.10 : Positions des thermocouples dans la Maquette

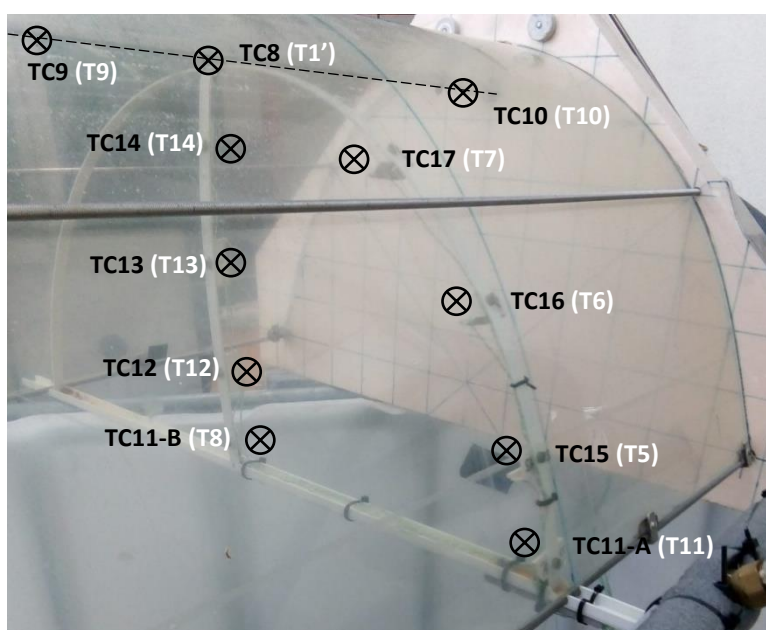


Figure 9.11 : Positions détaillées des thermocouples sur le Support amovible et la Rampe dans la Maquette

Les thermocouples sont reliés à une interface de mesures et d'acquisition des données Micrologger (CR3000 de Campbell Scientific, Fig. 9.12). Ce dernier enregistre aussi le débit/volume de chargement et de déchargement de l'eau chaude de la Maquette, via le débitmètre à impulsions (CD) situé sur la platine d'alimentation hydrothermique (Figures 9.3 et 9.5).

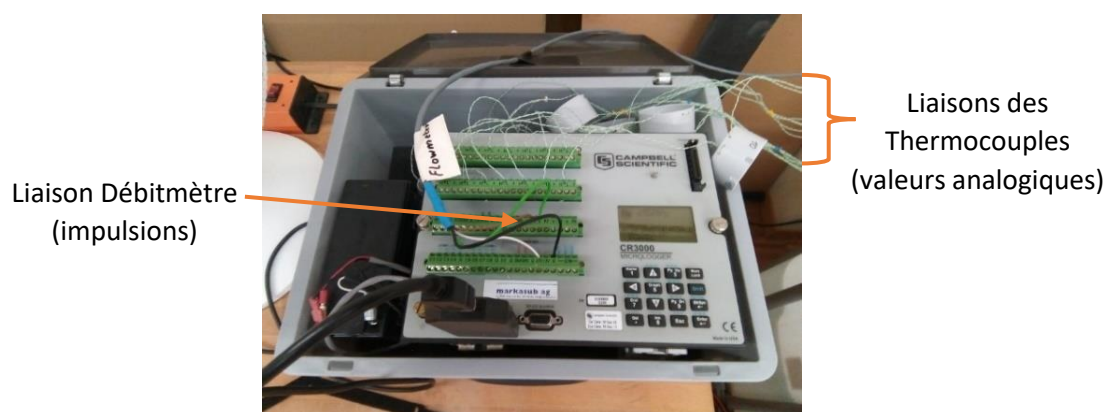


Figure 9.12 : Boîtier d'acquisition des données CR3000 de Campbell Scientific Micrologger

Thermocouple		Milieu	
Numéro	Position sur maquette	Humide / Sec	Symbole
1	Rampe Alimentation gauche	H	RAG
2	Rampe Alimentation droite	H	RAD
3	Réservoir sommet centre	H	RSC
4	Réservoir sommet latéral	H	RSL
5	Réservoir milieu centre	H	RMC
6	Réservoir milieu latéral	H	RML
7	Réservoir fond centre	H	RFC
8	Réservoir fond latéral	H	RFL
9	Fond sur béton	H	FSB
10	Fond milieu béton	H	FMB
11	Fond béton cuve	H	FBC
12	Air sous cuve	S	ASC
13	Eau fond cuve	H	EFC
14	Eau paroi latérale cuve	H	EPL
15	Air paroi latérale cuve	S	APL
16	Cuve sommet réservoir	H	CSR
17	Eau sommet cuve	H	ESC
18	Air sommet cuve	S	ASC
19	Sortie Mitigeur Réservoir	S	SMR
20	Sortie Mitigeur Cuve	S	SMC
21	Evacuation basse Cuve	S	EBC

Tableau 9.13 : Liste des thermocouples et leurs emplacements dans la Maquette et la cuve d'essais

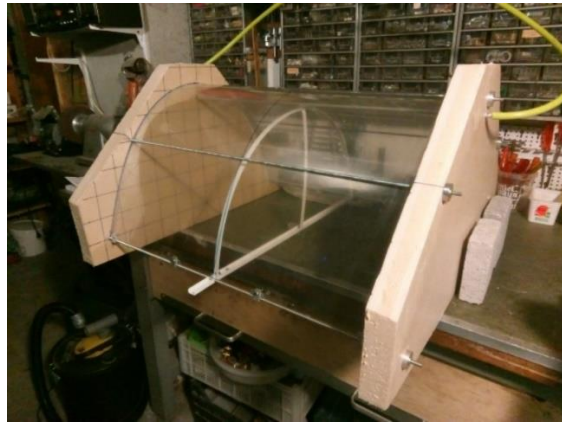
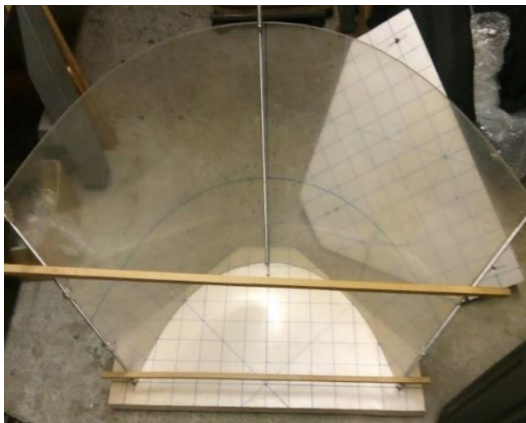


Figure 9.14.g : Construction de la Maquette, cintrage hyperbolique de l'enveloppe en polycarbonate (PC)

Figure 9.14.d : Assemblage et fixation des plaques d'extrémités en polystyrène extrudé (PSX)



Figure 9.15 : Construction de la Maquette, support pour lestage, cadre des pavés en béton (fond lacustre)

9.4 Reproduction des pertes thermiques à la base du Réservoir (fond lacustre)

La pose du Réservoir près du fond du lac permet à priori de bénéficier de son pouvoir isolant. La déperdition thermique dans le sol du fond lacustre est « diffusive », comme la propagation de la chaleur dans n'importe quel type de sol. **L'eau immobilisée dans la matrice du sol ne subit pas de convection.** Outre la conductibilité propre du sol (λ : W/m K), on bénéficie également de sa capacité thermique volumétrique (ρC : MJ/m³K) et qui varient selon sa composition.

Exemple pour quelques types de roches :

Roches -	Conductibilité λ (W/m K)	Capacité ρC (MJ/m ³ K)
	min – typique – max	min - max
Sédimentaires		
Calcaire	2.5 – 2.8 – 4.0	2.1 – 2.4
Marne	1.5 – 2.1 – 3.5	2.2 – 2.3
Grès	1.3 – 2.3 – 5.1	1.6 – 2.8
Non consolidées		
Gravier saturé d'eau	env. 1.8	env. 2.4
Moraine	1.0 – 2.0 – 2.5	1.5 – 2.5
Sable saturé d'eau	1.7 – 2.4 – 5.0	2.2 – 2.9
Argile/limon saturé d'eau	0.9 – 1.7 – 2.3	1.6 – 3.4
Pour comparaison		
Eau (immobilisée)	0.58	4.19
Glace (-10°C)	2.32	1.87
<u>Béton</u>	0.9 – 1.6 – 2.0	1.8

Tableau 9.16 : Comparatif de la Conductibilité et de la Capacité thermique de roches

La reproduction pour la Maquette du sous-sol lacustre est faite avec 4 grandes dalles en béton (40 x 40 x 4 cm) placées sur le fond de la cuve et par-dessus une couche de 35 petits pavés en béton (12.5 x 12.5 x 4 cm), maintenus dans un cadre en PVC, ainsi qu'éventuellement une couche d'environ 1 cm de sable. On s'approche ainsi des caractéristiques du fond lacustre avec un mix de roches sédimentaires et des matériaux sédimentés non consolidés. Des thermocouples sont placés entre et sur les dalles en béton (Figures 9.17 ci-dessous).

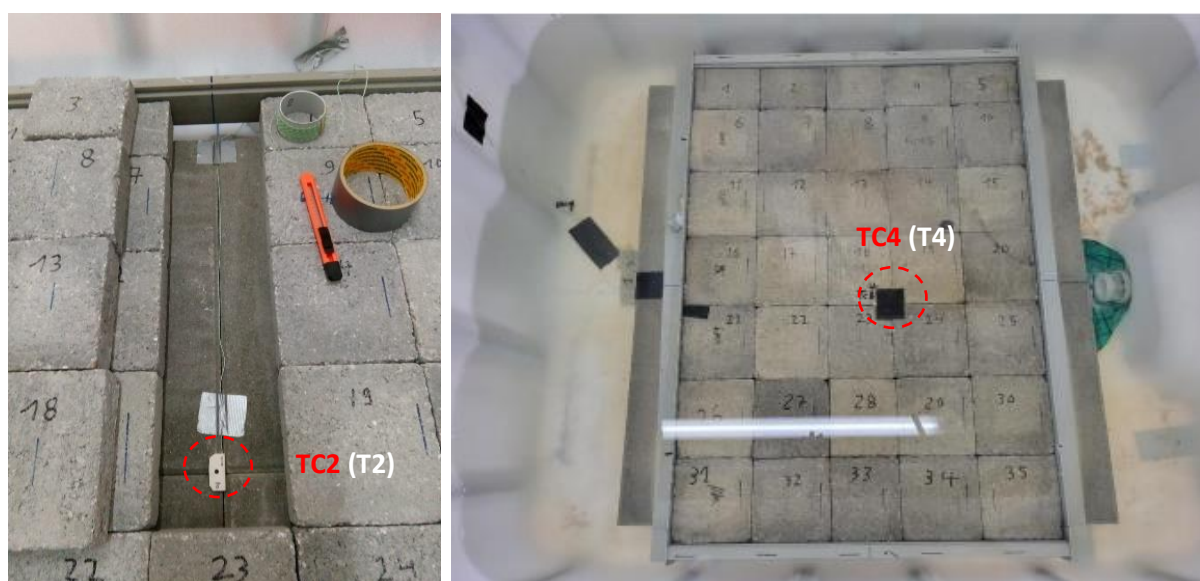


Figure 9.17 : Reproduction du fond lacustre dans la cuve d'essais avec des dalles et pavés en béton
Emplacement des Thermocouples entre (TC2) et sur (TC4) les dalles de fond, raccordement aux terminaux respectivement (T2) et (T4) du Datalogger

9.5 Constitution et Calibration des thermocouples type K

9.5.1 Constitution des thermocouples type K et leurs fixations

Visualisée sur la figure 9.18 de gauche, la jonction de mesure des thermocouples est formée uniquement par une torsade serrée et dénudée, sur une longueur d'environ 1 cm, des deux fils conducteurs type « K » (diamètres 0.18 mm, borne positive couleur verte : Nickel-chrome ; borne négative couleur blanche : Nickel-Aluminium).

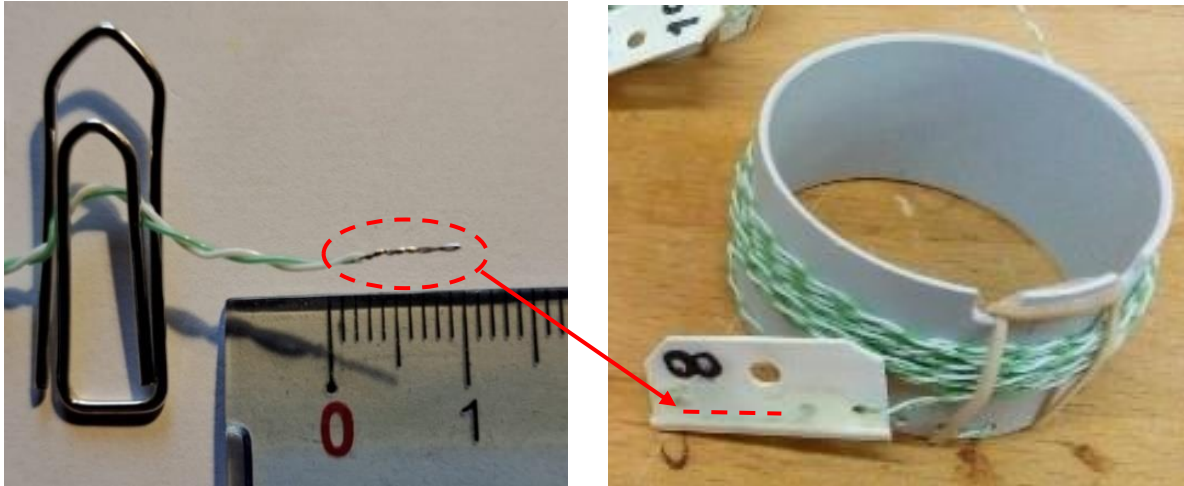


Figure 9.18 : Thermocouples TC8, type K, jonction torsadée et montée sur la plaquette de fixation avant calibration

Visualisée sur la figure 9.18 de droite, **ladite jonction est placée dans une gorge ou cuvette étroite (1 mm) sur le bord de la plaquette de fixation** (au support général des sondes dans la Maquette). La jonction est enrobée dans la cuvette d'une fine couche (≈ 1 mm) de colle-gel transparent, souple et résistant à l'eau (PATTEX). **Ce gel sert avant tout, à isoler électriquement la jonction de l'eau** et donc des autres thermocouples (évitant les interférences). Le câble torsadé est bloqué par la chicane des trous de passage dans la plaquette.

La plaquette en plastique PVC (25 x 10 mm) a une épaisseur de l'ordre du millimètre et entoure environ la moitié de l'enrobage de la jonction. **L'autre moitié de l'enrobage de la jonction est en contact direct avec l'eau**. La résistance thermique entre la jonction et l'eau est ainsi relativement faible. De plus avec la circulation de l'eau autour de la jonction du thermocouple, la résistance thermique de la couche limite d'eau devrait être négligeable.

9.5.2 Temps de réponse des thermocouples avec leurs fixations

Le temps de réponse de la jonction de mesure du thermocouple, aux variations de la température de l'eau (ΔT_e), est principalement déterminé par le produit de sa capacité thermique (C_{aj}) et de la conductivité thermique de l'interface de transfert de chaleur (C_{oi}) entre la jonction et l'eau en contact. Il est caractérisé par sa Constante de temps (τ_{rj}) selon la relation suivante :

$$\tau_{rj} = C_{aj} * C_{oi} \quad (9.1)$$

La distribution de la chaleur dans la jonction dépend de la conductivité intrinsèque du matériau constitutif (Nickel-Aluminium pour le thermocouple type K). Étant donné que la capacité thermique est identique pour tous les thermocouples type K, la constante de temps est uniquement modifiée par la conductivité thermique de l'interface jonction-eau (C_{oi}).

La partie éloignée de la cuvette de la plaquette de fixation ainsi que le support de tous les thermocouples dans la Maquette n'influence pratiquement pas le transfert de chaleur entre l'eau environnante et la jonction et donc son temps de réponse ($d^\circ C/dt$). La vis-écrou (M 2,5) de liaison plaquette-support en acier inoxydable s'équilibre en quelques secondes avec la température de l'eau environnante.

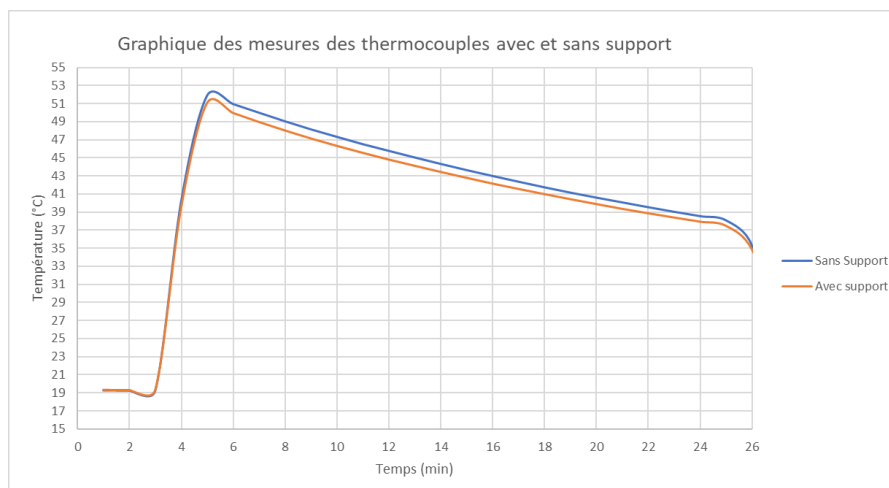


Figure 9.19 : temps de réponse des thermocouples (mesure réalisée par Daniel Bello Mendes, travail de master sur la simulation numérique de la Maquette et Réservoir ULISSE)

Le temps de réponse d'un thermocouple se traduit par l'inclinaison ($\alpha = dT/dt$, en °C/min) de la montée ou de la descente en température. Une différence de temps de réponse (Δt) entre deux thermocouples se traduit par un écart relatif entre leurs inclinaisons ($\Delta \alpha$). Le graphique de la figure 9.19 ci-dessus montre l'évolution temporelle de la température de deux thermocouples (Type K) plongés simultanément dans un verre d'eau chaude à près de 52 °C. On observe que le temps de montée de la température ($\Delta T \approx 33$ °C) des deux thermocouples sont identiques (2 minutes) ainsi que leurs pentes (α) sont superposées, pour atteindre simultanément la température nominale du verre d'eau.

Une différence de la température (ΔT_d) culmine à 1.2°C à la fin de leur échauffement maximum (en équilibre thermique avec l'eau chaude). L'écart (ΔT_d) est dû à la disparité de réponse et de non-linéarité intrinsèque entre les deux thermocouples. Ceci montre la nécessité de calibrer les thermocouples avant leur utilisation.

9.5.3 Calibration des thermocouples

Préalablement aux essais sur la Maquette, une campagne de calibration des thermocouples utilisés a eu lieu durant l'été 2022, à l'aide d'un Bain thermostatique de référence de laboratoire (JULABO).

9.5.4 Caractéristiques des thermocouples utilisés

Les thermocouples ont une disparité de réponse et de non-linéarité intrinsèque. La tolérance des thermocouples, type « K » utilisés dans la Maquette, est de +/- 1,5°C en classe 1 (entre - 40 et + 375 °C). Elle est même de +/- 2.5°C en classe 2 et 3.

Le **thermocouple de type K**, généralement appelé *Chromel/Alumel*, est conçu principalement pour les mesures de température générales dans des atmosphères les plus courantes (Tab. 9.20 ci-dessous).

Type K - Données techniques

Thermocouple Type K Conducteurs		Variation approximative par degré de la f.e.m. générée jonction de référence à 0°C $\mu V/^{\circ}C$ à			Tenue en température de la jonction de mesure		Classes de Tolérances à IEC 60584-1			
Positif	Négatif	100°C	500°C	1000°C	usage continu	usage intermittent	Type	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Nickel - Chrome Noms déposés: Chromel™, Thermokanthal KP®, NiCr, T1®, Tophel™	Nickel - Aluminium (magnétique) Noms déposés: Ni-Al, Alumel™, Thermokanthal KN™, T2™, NiAl™	42	43	39	0 à +1100°C	-180 à +1350°C	Domaine de tolérance Valeur de tolérance Domaine de tolérance Valeur de tolérance	-40°C à +375°C $\pm 1.5^{\circ}C$ 375°C à 1000°C $\pm 0.004 \cdot t $	-40°C à +333°C $\pm 2.5^{\circ}C$ 333°C à 1200°C $\pm 0.0075 \cdot t $	-167°C à +40°C $\pm 2.5^{\circ}C$ -200°C à -167°C $\pm 0.015 \cdot t $

1. La tolérance est exprimée soit sous la forme d'une déviation, soit sous la forme d'une fonction de la température.

2. Les matériaux thermoélectriques sont normalement fournis pour répondre aux tolérances de fabrication spécifiées dans le tableau pour les températures supérieures à -40°C. Cependant, ces matériaux peuvent ne pas répondre aux tolérances pour les basses températures de la classe 3 pour les thermocouples type T, E, K et N. Si les thermocouples doivent satisfaire simultanément à la classe 3 et à la classe 1 ou 2, l'acheteur doit l'indiquer, une sélection des matériaux étant normalement nécessaire.

Tableau 9.20 : Caractéristiques du thermocouple type K, (source : TC SA.fr)

Pour obtenir une précision ($\pm 10^{-2}$) de la Température mesurée (T_{mx}) avec un Thermocouple (TC_x), sa valeur mesurée (V_x) est affectée du **Facteur de Calibration ou de Correction (FC) du thermocouple**.

$$T_{mx} = V_x \cdot FC \quad (9.2)$$

Le Facteur de correction (F_c) du thermocouple est obtenu, lors de la calibration, par comparaison (quotient) entre la température de référence (T_r) du bain thermostatique et celle de la température mesurée (T_c).

$$FC = T_r / T_c \quad (9.3)$$



Figure 9.21 : Setup de calibration des thermocouples

Les thermocouples sont introduits dans le bain thermostatique, fixés ensemble sur une barrette pour éviter qu'ils bougent par le (fort) brassage de l'eau à l'intérieur. Les mesures sont enregistrées sur la Centrale d'acquisition de mesure rapide ou « Micrologger » (Campbell Scientific, CR 3000).

Le Data/Micrologger fait environ 43 mesures (échantillons) par seconde (1/23 ms) de la température des thermocouples, les convertit (analogique/digital) sur 16 bits, les stocke dans sa mémoire (4 MB) et les affiche en valeurs moyennes (Avg) sur 1 minute ($\approx 2'600$ mesures ou échantillons). Les données sont récupérées sur le PC portable pour analyse.

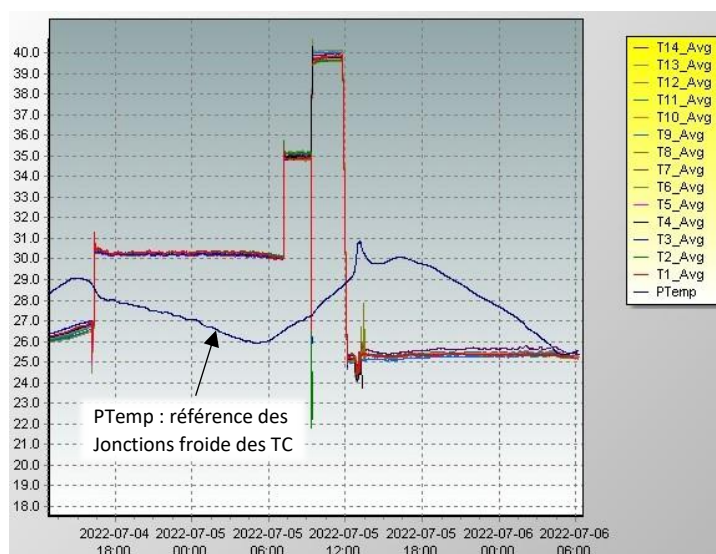


Figure 9.22 : Calibration des thermocouples pour la Maquette ULISSE, à l'aide du bain thermostatique de référence (JUMALO) du laboratoire HEPIA/LECEA. 1^{er} Calibration entre 4 et 22 juillet 2022. Observation de la disparité relative et de la stabilité temporelle sur les plages, 25, 30, 35 et 40°C et l'influence de PTemp.

Pour vérifier la linéarité thermique du thermocouple, la calibration se fait sur plusieurs *Paliers* de température, de P-5°C à P-40°C, par incrémentation de 5°C, sur des durées variables mais relativement longues (plusieurs heures).

Sur les figures 9.22 ci-dessus, la courbe bleue (PTemp) est la température du *built-in* thermistor (précision : +/- 0.5-0.8°C). Il sert de température de référence aux jonctions (ou soudures froides) des thermocouples. Entre les deux jonctions du thermocouple se produit une différence de potentiel ou tensions (f.e.m. de Seebeck) en rapport avec les températures des deux jonctions (chaude - froide).

C'est cette tension (f.e.m. en μV) qui est convertie en une température dans le Datalogger, sur la base d'une table de référence normalisée de la soudure froide précise, égale à 0°C. (*source TC SA.fr*). La température de référence (PTemp) pilote le circuit de compensation de la jonction froide située aux bornes H/L des terminaux analogiques différentiels et auxquelles sont connectés les thermocouples.

Sur la figure 9.22 on observe que PTemp varie périodiquement avec une amplitude de 5 °C en fonction de la température du local où est situé la Maquette, culminant l'après-midi (31°C) et déclinant jusqu'au petit matin (26 °C à 5-6H). **La calibration a lieu durant la canicule de juillet 2022**, avec l'arrêt de la ventilation du local au sous-sol et du bâtiment (fermeture estivale de l'école pour les étudiants).

On observe aussi des écarts (tolérance) lors des mesures de la température entre les thermocouples, ceci après une période de stabilisation ou d'équilibrage thermique (de la masse de matière métallique interne) des jonctions de mesure avec l'eau du bain thermostatique. Cette valeur « stabilisée » est prise en compte pour la calibration et non celle « transitoire » de la phase d'équilibrage thermique des thermocouples avec l'eau du bain.

Les valeurs pour TC1 à TC15 sont obtenues, sur les paliers de 10 à 40°C lors de la calibration du 4 au 6 juillet 2022 et reprises dans le tableau 9.23 ci-dessous. L'indication « NAN » signifie que le thermocouple n'est pas connecté pour la mesure correspondante. Ptemp montre la période « caniculaire » de la calibration. Sur la dernière ligne du tableau 9.23, FC10-40 est le Facteur de correction moyen sur l'ensemble des paliers.

PTemp °C	Palier °C	TC1 °C	TC2 °C	TC3 °C	TC4 °C	TC5 °C	TC6 °C	TC7 °C	TC8 °C	TC9 °C	TC10 °C	TC11-A °C	TC11-B °C	TC12 °C	TC13 °C	TC14 °C	TC15 °C
28,20	10	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	10,66	9,99	10,74	10,42	10,76	10,15	10,07	10,60	10,70
	FC10								0,938	1,001	0,931	0,960	0,929	0,985	0,993	0,943	0,935
27,60	15	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	15,57	15,12	15,64	15,40	15,67	15,25	15,19	15,57	15,59
	FC15								0,964	0,992	0,959	0,974	0,958	0,984	0,987	0,963	0,962
26,45	20	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	20,33	20,12	20,40	20,24	20,43	20,22	20,20	20,42	20,35
	TC20								0,984	0,994	0,980	0,988	0,979	0,989	0,990	0,979	0,983
28,25	25	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	NAN	25,32	25,24	25,37	25,34	25,41	25,36	25,39	25,59	25,34
	FC25								0,987	0,991	0,985	0,987	0,984	0,986	0,985	0,977	0,986
27,01	30	30,30	30,33	30,20	30,21	30,20	30,27	30,17	30,27	30,32	30,18	30,16	NAN	30,26	30,27	30,20	NAN
	FC30	0,990	0,989	0,994	0,993	0,994	0,991	0,994	0,991	0,989	0,994	0,995		0,991	0,991	0,993	
26,94	35	34,88	35,14	34,86	34,98	34,98	35,20	34,94	34,81	35,10	34,82	NAN	34,84	35,12	35,19	35,01	NAN
	FC35	1,003	0,996	1,004	1,001	1,001	0,994	1,002	1,005	0,997	1,005		1,005	0,997	0,995	1,000	
28,11	40	NAN	NAN	NAN	39,76	39,79	40,11	39,75	39,59	40,01	39,60	39,81	39,64	40,01	40,11	39,92	39,62
	FC40				1,006	1,005	0,997	1,006	1,010	1,000	1,010	1,005	1,009	1,000	0,997	1,002	1,010
Moyenne :		TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC9	TC10	TC11-A	TC11-B	TC12	TC13	TC14	TC15
FC10-40 :		0,997	0,993	0,999	1,000	1,000	0,994	1,001	0,983	0,995	0,981	0,985	0,977	0,990	0,991	0,980	0,975

Tableau 9.23 : Calcul des Facteurs de correction (FC) pour les 15 thermocouples (NAN = TC non connecté)
(Zone utile d'essais sur la Maquette, ΔT : 15°K)

Une seconde période de calibration est réalisée entre le 19 et le 22 juillet 2022 pour TC16 à TC21 avec les paliers de 5 à 40°C (Fig. 9.24 ci-dessous). La plage des paliers de températures de calibration couvre largement celle utilisée pour les essais sur la Maquette (20-35°C, ΔT : 15 K).

L'indication « NOV » pour le thermocouple TC19 signifie que la mesure est non valide due à un déplacement inopiné hors de l'eau du bain thermostatique. On observe que la température Ptemp a encore augmenté à plus de 31°C lors de la 2ème période « caniculaire » de la calibration.

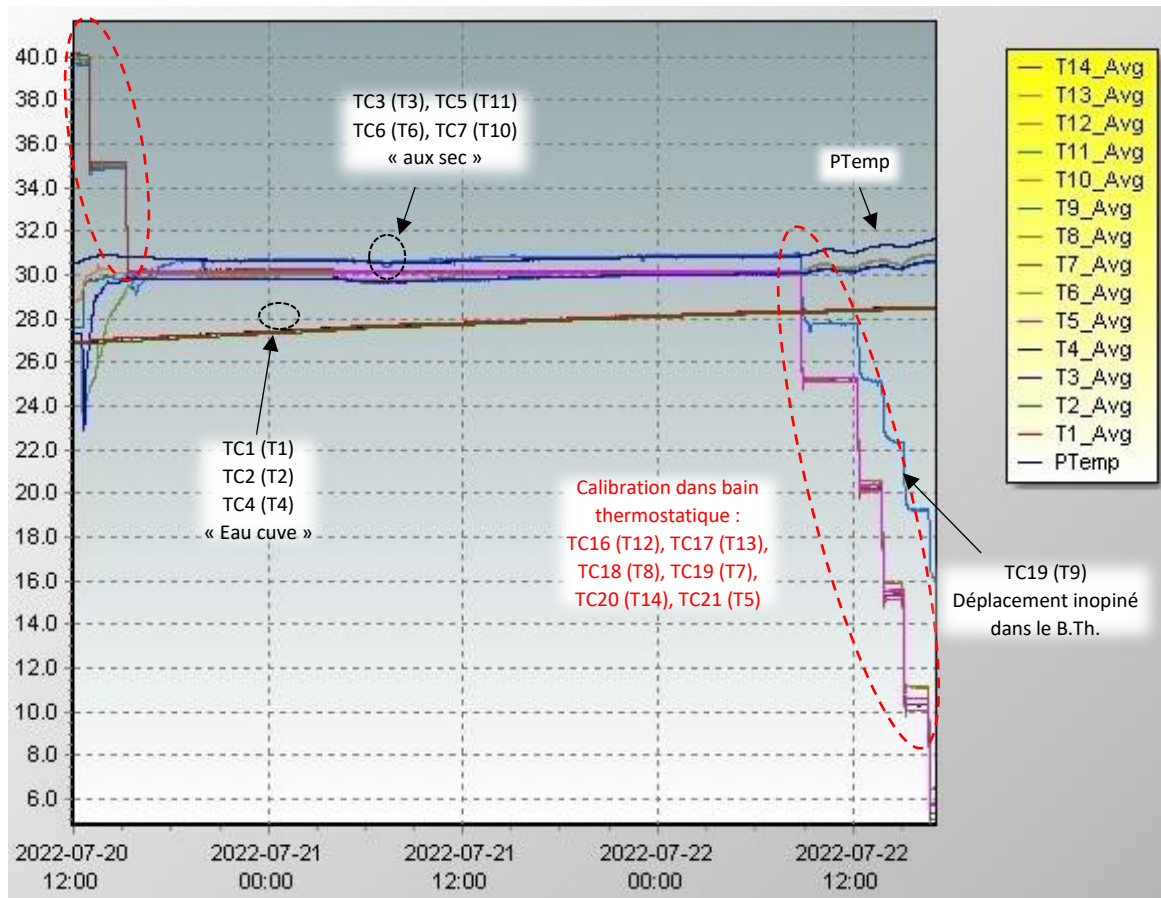


Fig. 9.24 : Calibration des thermocouples TC16 à TC21 (du 19 au 22 juillet 2022)

9.5.5 Détails de la procédure de calibration des Thermocouples TC16 à TC21

- 19.7.22 – 14 : 30 - **Connection TC16 sur Terminal T12** => dans Bain Thermostatique (BT) à 30°C
 - **Connection TC17 sur Terminal T13** => dans BT à 30°C
 - 15 : 51 - Palier BT à 35°C
 - 16 : 47 - Palier BT à 35°C
- 20.7.22 - 10 : 30 - **Connection TC18 sur Terminal T8** => dans BT à 40°C
 - **Connection TC19 sur Terminal T9** => dans BT à 40°C
 - **Connection TC20 sur Terminal T14** => dans BT à 40°C
 - 12 : 30 - Sortie TC6 de l'eau et TC7 (T10) de la Cuve (posés à coté)
 - Sortie TC3 (T3) de l'eau et TC5 (T11) de la Cuve (posés coté)
 - 12 : 56 - Palier BT à 35°C
 - 15 : 14 - Palier BT à 30°C
 - 15 : 35 - **Connection de TC21 sur Terminal T5** => dans BT à 30°C
- 22.7.22 - 08 : 45 - Palier BT à 25°C
 - 12 : 14 - Palier BT à 20°C
 - 13 : 45 - Palier BT à 15°C
 - 15 : 00 - Palier BT à 10°C
 - 16 : 38 - Palier BT à 5°C
 - 16 : 53 – **Fin de la 2ème période de calibration et d'enregistrement (TC16-TC21).**

PTemp °C	Palier °C	TC16 °C	TC17 °C	TC18 °C	TC19 °C	TC20 °C	TC21 °C
31,61	5	5,07	5,78	6,46	NOV	5,31	5,76
	FC5	0,986	0,866	0,775		0,942	0,868
30,66	10	10,08	10,65	11,14	NOV	10,30	10,63
	FC10	0,992	0,939	0,898		0,971	0,941
31,29	15	15,16	15,58	15,89	NOV	15,36	15,56
	FC15	0,990	0,963	0,944		0,977	0,964
31,36	20	20,11	20,41	20,56	NOV	20,27	20,40
	FC20	0,995	0,980	0,973		0,987	0,980
31,05	25	25,14	25,30	25,31	NOV	25,25	25,28
	FC25	0,995	0,980	0,973		0,987	0,980
30,85	30	30,13	30,17	30,01	29,50	30,21	30,15
	FC30	0,996	0,994	1,000	1,017	0,993	0,995
30,83	35	35,14	35,07	35,00	34,89	35,19	NAN
	FC35	0,996	0,998	1,000	1,003	0,995	
30,76	40	40,09	39,91	39,85	39,66	40,10	NAN
	FC40	0,998	1,002	1,004	1,009	0,998	
31,05	Moyenne	TC16	TC17	TC18	TC19	TC20	TC21
	FC10-40	0,993	0,965	0,946	1,009	0,981	0,955

Tableau 9.25 : Calibration des thermocouples TC16 à TC21 (19-22.07.2022)

(Zone utile d'essais sur la Maquette, $\Delta T : 15^{\circ}K$)

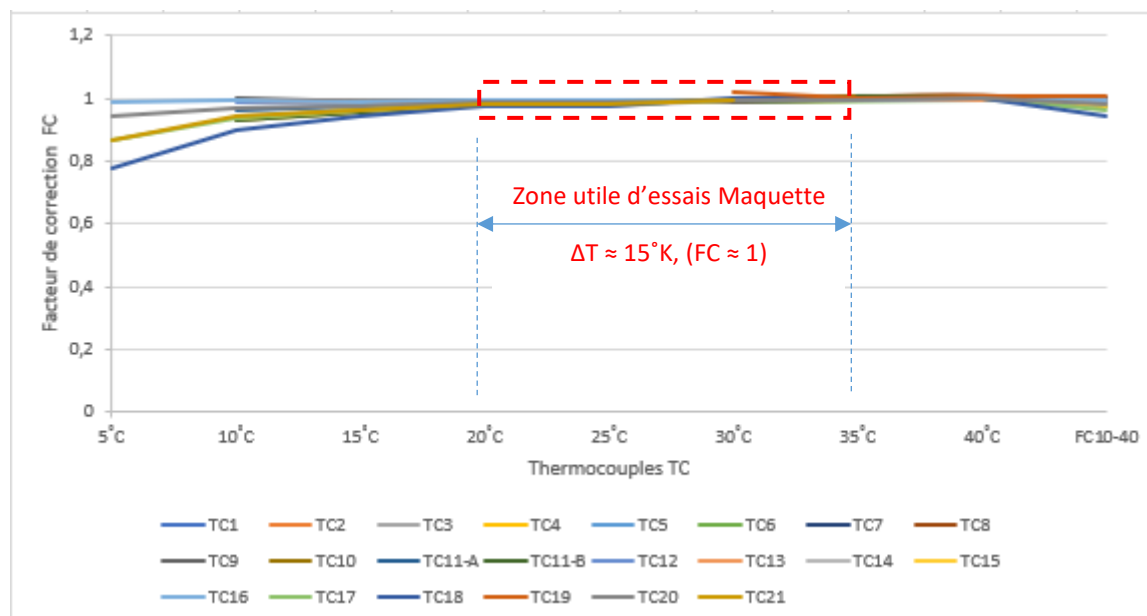


Figure 9.26 : Facteurs de correction (FC) des thermocouples en fonction de la température (du 4 au 22.07.2022)

10 Facteur d'Échelle Temporelle (FET) du Réservoir réel vs Maquette

10.1 Analyse dimensionnelle

Une analyse dimensionnelle est indispensable pour établir une relation entre le temps caractéristique propre au Réservoir réel avec celui de la Maquette. La Maquette représente une « tranche linéaire » d'environ 1/5 du Réservoir réel (figure 10.1 ci-dessous). Le rapport, du volume de la tranche du Réservoir réel avec celui de la Maquette ($4.10^5 \text{ m}^3 / 7,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$) est de $4,7 \cdot 10^6$.

Selon certains points de vue, deux objets isomorphes peuvent être considérés comme identiques, ou du moins indiscernables, ce qui permet de transposer des résultats et propriétés démontrés de l'un à l'autre. En effet, bien souvent, les propriétés intéressantes d'un objet seront partagées par tous les objets isomorphes de la catégorie (source : Wikipédia/Isomorphisme).

Si les rapports géométriques caractéristiques de l'enveloppe du Réservoir sont les mêmes que ceux de la Maquette : [hyperbole de Rayon (R) à la base, avec la longueur de courbure (Loh) dans un rapport identique de ($\pi = Loh/Rc$) ainsi que ladite base ($2Rc$) égale la longueur longitudinale (L) de l'enveloppe], on peut les considérer comme isomorphes et les attribuer un *facteur de formes* (FF) égale à -1-.

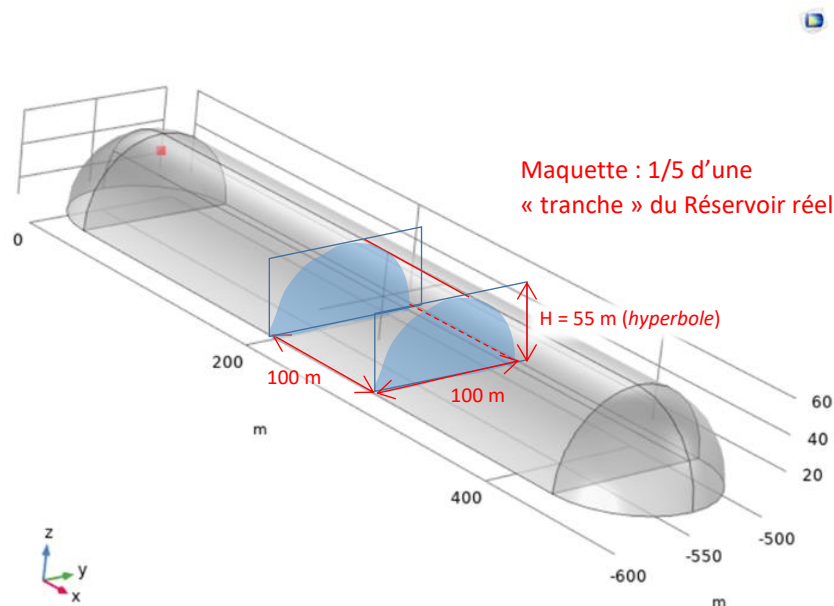


Figure 10.1 : Représentation approchée en perspective avec dimensions (m) du Réservoir réel ($2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) et la « tranche » ($1/5 = 400'000 \text{ m}^3$) correspondant à la Maquette (0.077 m^3)

(Figure de base : Roland Rozsnyo, HEPIA, logiciel COMSOL Multiphysics, simulation numérique ULISSE)

Néanmoins, outre leurs rapports de formes et de tailles (Rr/m , Lr/m), la matière et l'épaisseur respectives de leur enveloppe ne sont pas les mêmes (5 cm de verre cellulaire pour le Réservoir réel vs 2 mm de polycarbonate pour la Maquette).

De plus, la conductibilité thermique des enveloppes ($\lambda_{env} : \lambda_r, \lambda_m$) diffère également du fait que, contrairement à la Maquette, l'enveloppe du Réservoir réel comporte, outre les pavés en verre cellulaire, les **joints intercalaires (Ctjin)** et les **jonctions des bandes de l'enveloppe (Ctjon)**. Ceux-ci augmentent la Conductibilité thermique totale de l'enveloppe du Réservoir réel par rapport à celle des pavés seuls ($\lambda_{env} : 0.05 \Rightarrow 0.066 \text{ W/m.K}$, voir § 10, éq. 9.67).

Afin de pouvoir interpréter correctement, entre eux, les résultats des mesures obtenues expérimentalement (Maquette physique) avec ceux obtenus par calculs (Excel, simulation numérique COMSOL), on détermine leur *Facteur d'Échelle Temporelle* (FET) approprié (adimensionnel, [-]). Celui-ci va corréliser les différents rapports dimensionnels et les caractéristiques des matériaux constitutifs de l'enveloppe des deux objets (Réservoir réel grandeur nature et Maquette à échelle réduite).

L'analyse dimensionnelle, non exposé davantage ici, montre un rapport entre le temps caractéristique propre au Réservoir réel avec celui de la Maquette et que l'on qualifie ici de *Facteur d'Échelle Temporelle* du Réservoir/Maquette (FET). Avec un facteur de forme Réservoir/maquette égal à 1, on obtient le FET suivant :

$$FET = t_r / t_m = (FF) \cdot (R_r / R_m) \cdot (E_{pr} / E_{pm}) \cdot (\lambda_m / \lambda_r) \quad [-] \quad (10.1)$$

$$FET = (1) \cdot (50 / 0,29) \cdot (0,05 / 0,002) \cdot (0,21 / 0,066) = \quad \mathbf{13'715} \quad [-] \quad (10.2)$$

avec :

t_r	le temps caractéristique du Réservoir réel	
t_m	le temps caractéristique de la Maquette	
FF	facteur de formes Réservoir réel/Maquette	(1)
R_r	le Rayon transversal caractéristique du Réservoir réel	(50 m)
R_m	le Rayon transversal caractéristique de la Maquette	(0,29 m)
E_{pr}	l'épaisseur de l'enveloppe du Réservoir (isolant verre cellulaire)	(0.05 m)
E_{pm}	l'épaisseur de l'enveloppe de la Maquette (polycarbonate)	(0,002 m)
λ_r	Conductibilité thermique de l'enveloppe du Réservoir	(0,066 W/mK)
λ_m	Conductibilité thermique de l'enveloppe de la Maquette	(0,21 W/mk)

En clair le FET = 13'715 signifie que **1 minute écoulee pour la Maquette correspond à 13'715 minutes, soit près de 229 heures ou près de 10 jours de temps (t_r) écoulé pour le Réservoir réel !**

Un cycle complet d'une année réelle ($t_r = 8'760$ h) correspond à 38.3 minutes de temps Maquette (t_m), soit **1 mois réel de Réservoir lacustre correspond à 3.2 minutes de temps Maquette.**

Le rapport (13'715) entre la durée des différentes phases de fonctionnement sur une année réelle (t_r) correspondrait alors pour la Maquette (t_m) à :

		Réservoir (t_r)		Maquette (t_m)
1.	Chargement Estival (CE) 2 mois	<=> 6.4		minutes
2.	Stagnation Automnale (SA)	2 mois	<=> 6.4	minutes
3.	Déchargement Hivernal (DH)	6 mois	<=> 19.1	minutes
4.	Stagnation Printanière (SP)	2 mois	<=> 6.4	minutes
<u>Cycle de fonctionnement annuel</u>		12 mois (t_r)	<=> 38.3	minutes (t_m)

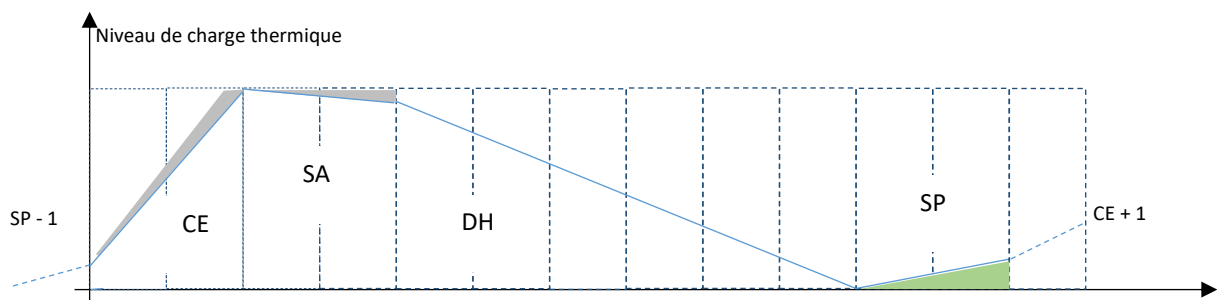


Figure 10.2 : Phases de fonctionnement dynamique du Réservoir ULISSE (cycle annuel)
(Zones grises : pertes / gain exergétiques)

Selon cette première approche, avec un FET = 13'715, entre le Réservoir réel et sa Maquette de taille réduite, l'évolution temporelle de leurs températures internes et donc aussi de leurs bilans énergétiques peuvent être corrélés.

10.2 Autre approche : Constante de temps du Réservoir réel et de la Maquette

La déperdition thermique de l'enveloppe du Réservoir réel ainsi que de la Maquette évolue de façon **similaire au déchargement d'un condensateur électrique (C) au travers d'une résistance (R)**. Pour être plus précis il faudrait considérer que le condensateur se décharge, au travers de la résistance, dans un condensateur d'une capacité comparativement quasi-infinie et qui représenterait le lac. Ainsi la tension aux bornes du condensateur (lac) reste quasi constante et on peut alors considérer uniquement la différence de potentiel (écart températures lac-réservoir) aux bornes du condensateur (Réservoir) qui nous concerne.

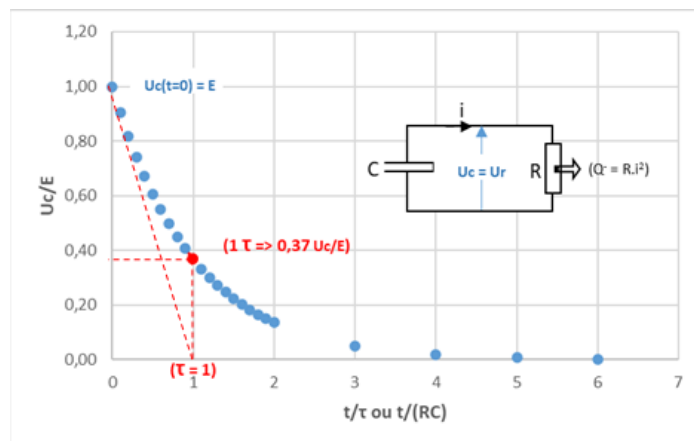
L'évolution de la température du Réservoir ou de la Maquette en fonction du temps $[Tr(t)]$ est donc par analogie la tension $[Uc(t)]$ aux bornes du condensateur électrique, qui suit une exponentielle décroissante caractéristique.

$$Uc(t) = E \cdot e^{-t/\tau} \quad [V] \quad (10.3)$$

où τ est la **constante de temps caractéristique du circuit électrique** ($\tau = RC$), exprimée en [s] et « C » est la Capacité du condensateur (en Farad ou [A.s/V]) et « R » la Résistance (en Ω ou [V/A]).

La tension $[Uc(t)]$, représentée sur le graphique 10.4 ci-dessous, suit la courbe exponentielle décroissante « réduite » (Uc/E), dont la tangente à l'origine coupe l'abscisse (= 1) pour $t = \tau$. Le rapport de tension aux bornes du Condensateur et de la Résistance est alors :

$$Uc(\tau)/E = e^{-1} = 0.37 \quad [-] \quad (10.4)$$



Graphique 10.4 : Courbe exponentielle décroissante de décharge du Condensateur au travers de la Résistance

Les corollaires du circuit électrique pour le Réservoir et la Maquette sont alors les suivants :

- la *conductance* ($1/Ro$) de leur enveloppe $Co = \lambda \cdot S / \epsilon$ $[W/K]$ (10.5)

où « λ » est la conductivité en [W/m.K], « S » est la surface en [m²], et « ϵ » l'épaisseur en [m] de leur enveloppe respective,

- la *capacité thermique* $Ca = Q / \Delta Tr-l$ $[J/K]$ (10.6)

où « Q » est le contenu d'énergie-chaleur dans le Réservoir en Joules [J] et « $\Delta Tr-l$ » est l'écart de température entre le Réservoir et le lac, soit le gradient de température sur l'enveloppe. La charge thermique Q dépend aussi du volume actif (Va) et de la chaleur volumique de l'eau chaude stockée ($ce = 4.18 \text{ MJ/m}^3.K$).

La « *Constante de temps thermique* » (τ_r) du Réservoir ou de la Maquette (τ_m) avec leur enveloppe respective, s'exprime bien en un temps :

$$\tau = Ca \cdot Co^{-1} \quad [s] \quad (10.7)$$

Avec les caractéristiques propres du Réservoir réel, comprenant l'enveloppe hyperbolique et le niveau de la thermocline à front plat, on retrouve la **Constante de temps thermique (τ_r)** correspondante exprimée en années [an] :

Capacité Thermique	Niveau Thermocline	Enveloppe Hyperbolique		Enveloppe Hyperbolique
(Ca) [GJ/°K]		(Ro) [°K/KW]	(Co) [KW/°K]	($\tau_r = Ca.Co^{-1}$) [an]
672	Haut	0,04	25,48	0,84
4 197	Milieu	0,01	76,72	1,73
8 395	Bas	0,01	109,96	2,42

Tableau 10.5 : Constante de temps thermique (τ_r) du Réservoir réel en fonction du niveau de la Thermocline

Le même calcul peut être fait pour la Maquette (τ_m) avec ses caractéristiques propres :

Capacité Thermique.	Niveau Thermocline	Enveloppe Hyperbolique		Enveloppe Hyperbolique
(Ca) [KJ/°K]		(Ro) [°K/KW]	(Co) [KW/°K]	($\tau_m = Ca.Co^{-1}$) [min]
28	Haut	47,41	0,021	22,49
178	Milieu	24,38	0,041	72,29
356	Bas	17,07	0,059	101,21

Tableau 10.6 : Constante de temps thermique (τ_m) de la Maquette en fonction du niveau de la Thermocline

Les « années » pour le Réservoir réel correspondent à des « minutes » pour la Maquette. Le Facteur (Fct) ou le rapport entre les constantes de temps thermiques, τ_r et τ_m (ramenés chacune en heures), est le suivant :

$$Fct = \tau_r / \tau_m = (2,42 \times 8'760 \text{ h.an}^{-1}) / (101,21/60 \text{ min.h}^{-1}) = 12'566 \quad [-] \quad (10.8)$$

Ce rapport est inférieur d'environ 7 % à celui du *facteur d'échelle temporelle* (FET) de 13'715 (§16). Il est dû au *facteur de forme* (FF) entre le Réservoir et la Maquette qui n'est pas exactement égal à 1.

En effet, le résultat du tableau 10.5 est basé sur la forme réelle du Réservoir avec ses extrémités en « *demi-hyperboloïdes* », alors que le résultat (16.2) considère en première approximation une « tranche » de 1/5 du Réservoir linéaire. Le Réservoir (en forme de tunnel) étant 5,6 fois plus long que large (équ. 7.3) et le flux de chaleur étant principalement transversal.

Ce flux de chaleur transversal est « canalisé » dans la Maquette entre les plaques d'extrémités en 4 cm de polystyrène, qui sont quasi « athermanes » (236 fois moins conducteur thermique que l'enveloppe hyperbolique (2 mm de polycarbonate).

Dès lors, que le FET serait plus proche du Fct, les 4 phases de fonctionnement de la Maquette augmenteraient aussi de 7 %, ce qui ne change pas fondamentalement les résultats des essais. Par exemple, pour la phase la plus significative qu'est le Déchargement Hivernal et qui dure 6 mois pour le Réservoir grandeur-nature, la durée pour la Maquette passerait de 19,1 à 20,9 minutes. Toutefois, l'ajustage du débit du déchargement total de la Maquette (77 litres), dans le temps imparti, n'a pas été facile à obtenir, malgré l'utilisation d'une alimentation stabilisée pour la pompe.

10.3 Observations réelles sur la Maquette

La figure 10.7 (et 10.10) ci-dessous représente l'essai (03.11.2022) du refroidissement « passif » (sans extraction d'eau) de la Maquette, remplie au départ d'eau plus chaude que la cuve ($\Delta T_m(t_0) = 15,8^\circ\text{K}$) et qui est proche à l'écart typique pour le Réservoir réel en fin de Chargement Estival. Avec cet écart de température de départ, on peut déduire la constante de temps du refroidissement (τ) :

$$\tau = 0.37 \Delta T_m(t_0) = 0.37 * (T_m(t_0) - T_c) = 0.37 * (37,28^\circ\text{C} - 21,52^\circ\text{C}) = 5,8^\circ\text{K} ; T_m @ t = 1\tau = 28,7 [^\circ\text{C}] \quad (10.9)$$

On y observe que la constante de temps du refroidissement de la Maquette τ_m est de 109 minutes, soit 8 de plus que celle calculée théoriquement (T_m : 101.21 min, tableau 10.6, thermocline bas). Ce temps supérieur est en partie lié au **manteau d'isolation (partielle) qui a été retiré (13 minutes après la fin du chargement), ce qui a ralenti partiellement et temporairement le refroidissement et donc augmenté proportionnellement la constante de temps caractéristique de la Maquette.**

Ceci s'observe clairement, sur le graphique 10.7 ci-dessous, par la décroissance moins rapide (pente) de la courbe de température durant les 13 premières minutes. Sans ce retard dans la procédure de l'expérience, ce premier résultat converge avec le résultat du calcul théorique !

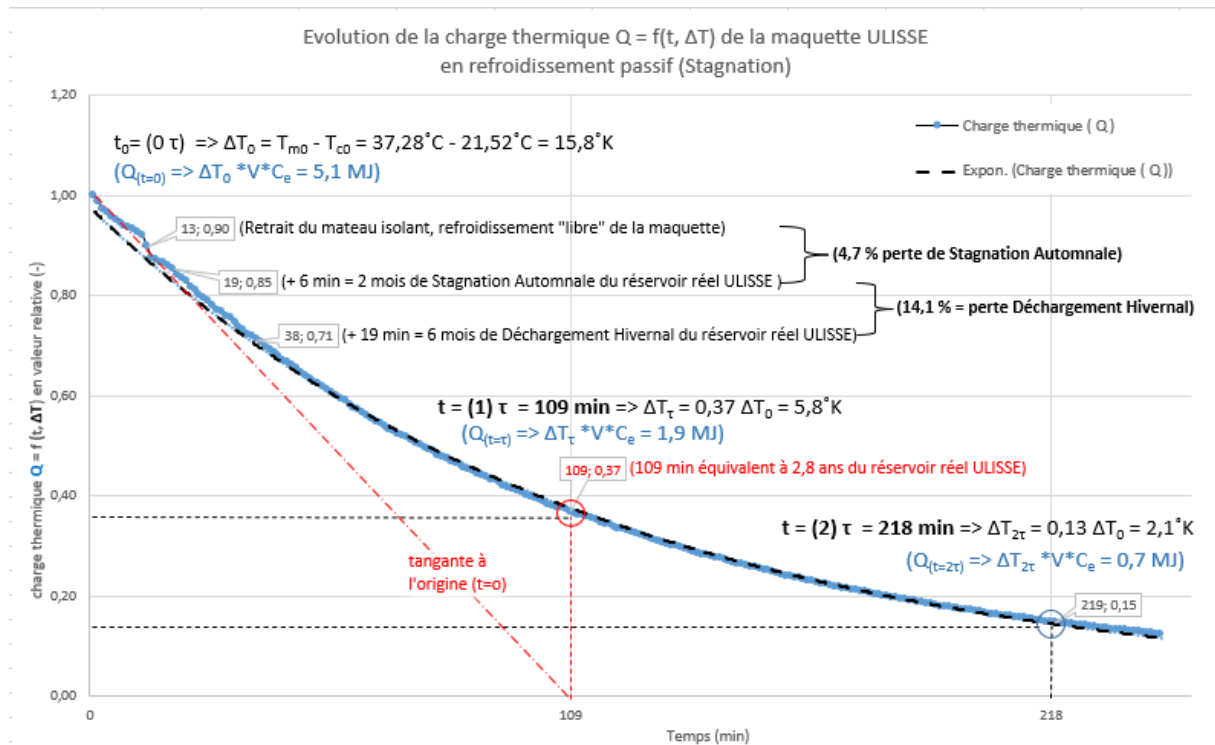


Fig. 10.7 : Evolution de la charge thermique (Q) ou du contenu d'énergie-chaleur de la Maquette durant son refroidissement passif, suivant une exponentielle décroissante avec une constante de temps T_m de 109 min.

Au final, avec le FET, les 109 minutes de la Maquette correspondent aux 2,8 ans du Réservoir réel pour perdre « passivement » (sans déchargement hivernal d'eau tempérée) environ 2/3 de l'énergie-chaleur chargée initialement (CEN).

Au-delà du graphique 10.7, l'équilibre thermique avec l'eau environnante est pratiquement atteint à 5τ ; c'est-à-dire en 8,4 heures pour la Maquette et 12 ans pour le Réservoir réel.

A titre de comparaison, sur le graphique 10.7 ci-dessus, sont également représentées proportionnellement, la phase de Stagnation Automnale de 6 minutes (2 mois pour le Réservoir réel, perte 4,7 %) et la phase de Déchargement Hivernal d'environ 20 minutes, équivalent à 6 mois réels (perte 14,1 %).

10.4 Remarque : Manteau isolant temporaire amovible

Lors de cet essai, sur une longue durée (jusqu'à l'équilibre thermique avec la cuve d'essais), le remplissage préalable d'eau tempérée dans la Maquette est réalisé avec une isolation temporaire et amovible sur l'enveloppe (Fig. 10.8 et 10.9). Ceci afin de minimiser la modification de la température de l'eau de la cuve d'essais **et s'approcher le mieux possible de la réalité étant donné que la température du lac n'augmente pas par la perte de chaleur du Réservoir.**



Figure 10.8 : Isolation temporaire limitant la déperdition thermique de la Maquette lors de son chargement

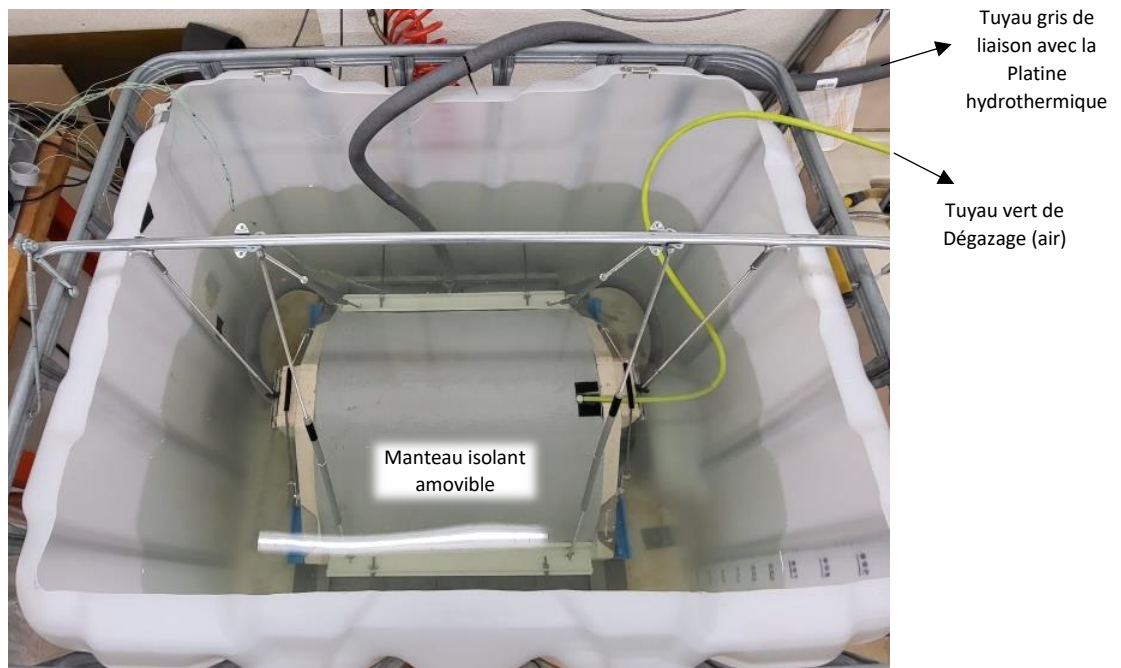


Figure 10.9 : Maquette avec manteau isolant amovible lors d'un chargement thermique (essai 3.11.2022)

Après le chargement de la Maquette, le retrait du manteau isolant doit se faire lentement pour ne pas brasser l'eau de la cuve d'essais. C'est ce qui n'avait pas été fait correctement et s'observe par la chute brutale de la température dans la partie basse de la Maquette sans toutefois perturber le reste du volume interne de la Maquette (la stratification thermique supérieure est restée inchangée).

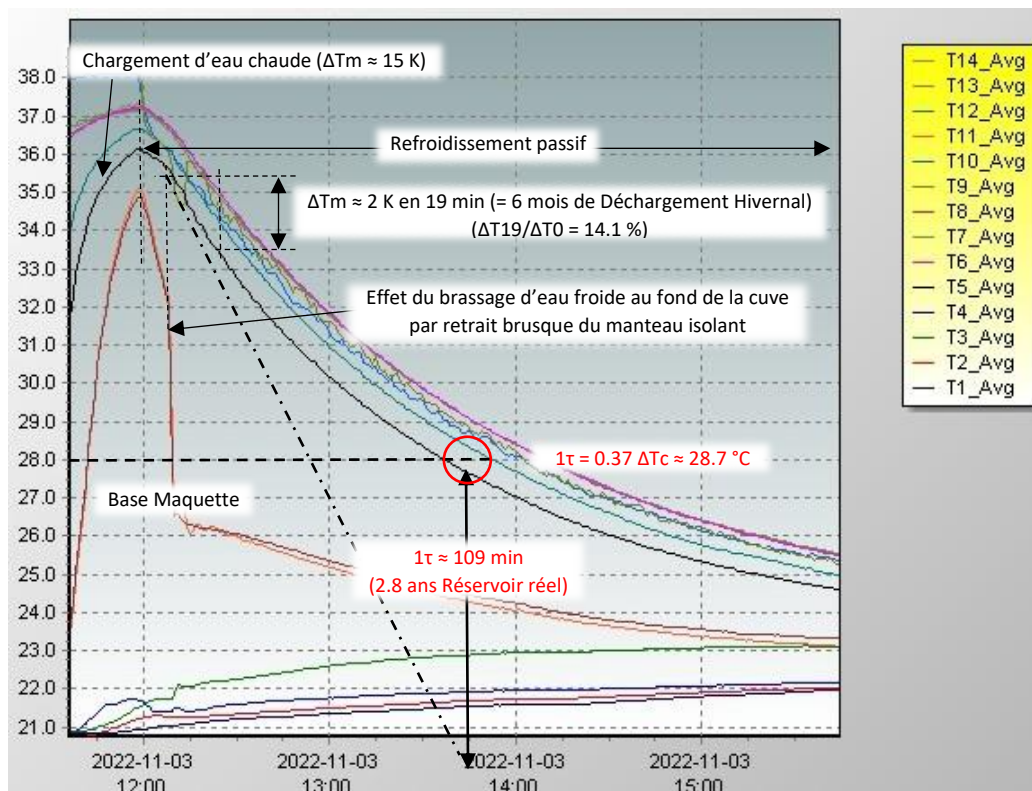
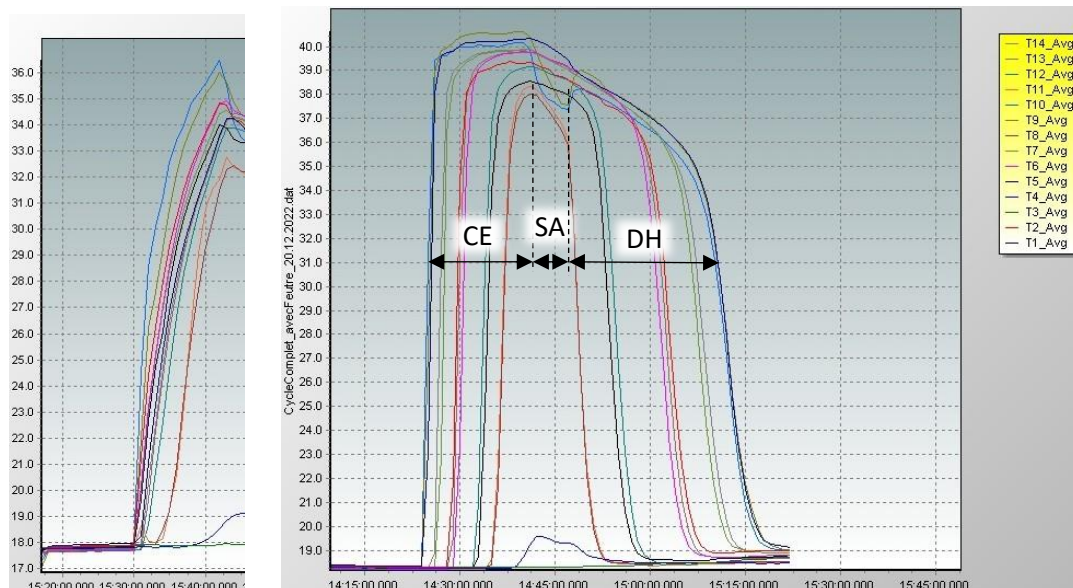


Figure 10.10 : Évolution de la température lors du refroidissement passif de la Maquette (essai 03.11.2022)

10.5 Exemple de cycle complet sur la Maquette (essai du 20.12.2022, Annexe 1.8)

Cet essai comprend un cycle complet sur la Maquette, avec le Chargement Estival (CE), la Stagnation Automnale (SA) et la phase de Déchargement Hivernal (DH). Pour réduire à supprimer le brassage lors de l'injection d'eau chaude au sommet de la Maquette, une grille de répartition avec une nappe de feutre en fibre de verre a été placée sous la rampe d'injection (Figure 9.7). **Suite à l'Annexe 1.8.**



Graphique 20 : Comparaison de stratification durant la phase de chargement, sans (fig. gauche) et avec (fig. droite) une grille + feutre répartiteur du flux d'injection d'eau (débit identique) via la rampe sommitale de la Maquette (essais 19 et 20.12.2022)

10.6 Bilan énergétique du Réservoir réel et de la Maquette

10.6.1 Considérations liminaires

Pour établir l'efficacité du stockage saisonnier d'énergie-chaleur du Réservoir type ULISSE, on a déterminé et comptabilisé les pertes thermiques de toutes les phases de fonctionnement annuel du Réservoir grandeur nature ainsi que celles de sa Maquette à échelle réduite. **Dans ce bilan énergétique on a clairement distingué la Perte Thermique du Chargement Estival (PTC).** Ainsi on a défini globalement, les *Pertes Thermiques - Brutes* (PTB, comprenant celle de la Stagnation Automnale, du Déchargement Hivernal, - Et - du Chargement Estival,) et les *Pertes Thermiques - Nette* (PTN, sans CE).

Sa justification tient au fait que, **La Perte Thermique du Chargement Estival (PTC) du Réservoir ULISSE n'est pas un enjeu majeur**, car l'énergie électrique d'alimentation des pompes serait essentiellement d'origine Photovoltaïque (PV). De plus, avec le développement massif du PV, le chargement (estival) des Réservoirs ULISSE réduirait d'autant le potentiel et paradoxal recours au « peak-shaving » (écrêtage de la production électrique estivale excédentaire par la mise à l'arrêt d'installations PV).

Au demeurant, la *Perte Thermique du Chargement Estival* (PTC) du Réservoir ULISSE est la somme de la déperdition thermique de son enveloppe et l'eau excédentaire injectée au-delà de sa capacité volumique. Cette dernière résulte de la compensation partielle de la perte d'enveloppe et de la modification de la thermocline interne au Réservoir (par diffusion thermique et brassages multiples). L'établissement du bilan énergétique ou de l'efficacité de stockage du Réservoir ULISSE et de la Maquette partent donc de la capacité thermique ou de la **Charge Estivale Nette ou Nominale (SEN).**

10.6.2 L'établissement des pertes thermiques est fait selon 3 approches différentes :

- 1. Par calculs selon un **modèle théorique** de la Maquette et du Réservoir grandeur nature, en considérant la *Surface « active »* (S_a) et la *Conductibilité thermique* (Cot) de l'enveloppe isolante ainsi que l'écart (ΔT_{r-l}) entre la température moyenne du Réservoir (T_r) et celle du lac environnant (T_l). Spécifiquement, pour les phases dynamiques, en intégrant l'évolution de la perte d'énergie-chaleur en fonction du remplissage du Réservoir ou du niveau de la thermocline (volume « actif » d'eau chaude).
- 2. Par calculs basés sur les données physiques réelles (températures, débits) acquises de **l'expérience sur la Maquette**, reproduisant l'essentiel du cycle annuel de fonctionnement, qui comprend les phases « dynamiques » (*Chargement Estival*, *Déchargement Hivernal*) et la phase « statique » de *Stagnation Automnale*.
- 3. Par la **simulation numérique** (COMSOL Multiphysics) de la Maquette et du Réservoir réel.

Préalablement à la réalisation des expériences sur la Maquette on a déterminé **le Facteur d'Échelle Temporelle (FET) entre le Réservoir réel grandeur nature et la Maquette à échelle réduite** (§ 10). Afin de vérifier la cohérence entre la Maquette, le Réservoir réel (modèle théorique) et la simulation numérique, on a comparé la **Constante de temps caractéristique** (τ_r) de leur refroidissement passif respectif. Ceci permet de valider la cohérence (convergence) entre les résultats des trois approches.

10.6.3 Modèle théorique

Le modèle théorique fait l'hypothèse conservatrice de l'absence d'un gradient de température dans l'eau de la partie active du Réservoir et celle du lac environnant (la cuve pour la Maquette). Ceci implique que le gradient thermique sur l'enveloppe et donc la déperdition thermique en régime stationnaire seront maximaux (R_i et $R_e \approx 0$), soit le cas le plus défavorable (absence d'une couche limite isolante).

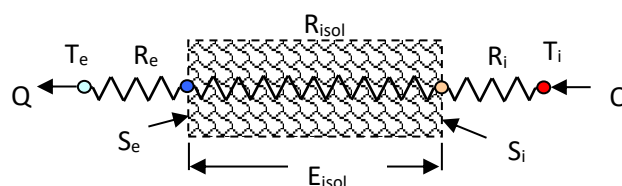


Figure 10.11 : Représentation du model thermique simplifié de l'enveloppe du Réservoir

Du fait de la convection libre ainsi que des courants de circulation de l'eau (advection), autour de l'enveloppe du Réservoir subaquatique, la résistance thermique de l'eau à l'intérieur (R_i) et à l'extérieur (R_e) sont réduites au maximum (R_i et $R_e \approx 0$) :

$$R_i = 1/(h_i \cdot S) \quad (10.10)$$

avec h_i le coefficient d'échange thermique de l'eau interne en convection libre = $100 - 900 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$

A l'intérieur du Réservoir en dehors de la convection libre, il n'y a à priori pas de courants de circulation d'eau autres que ceux de l'injection et de l'extraction d'eau sommitale (rampe de distribution).

$$R_e = 1/(h_e \cdot S) \quad (10.11)$$

avec h_e le coefficient d'échange thermique de l'eau externe en convection libre et forcée due aux courants de circulation = $100 - 15'000 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$

Selon la figure 10.12 ci-dessous, le modèle théorique considère que la surface active (S_a) et le volume actif (V_a) du Réservoir ou de la Maquette évoluent à chaque période de temps et que la perte de chaleur concomitante est exclusivement située dans la partie « active » (chaude) au travers de la surface active de l'enveloppe du Réservoir.

Le modèle théorique fait aussi hypothèse, certes simplifiée, d'une **température moyenne homogène dans le volume actif** (par la convection et l'advection). La stratification thermique dans le Réservoir est alors réduite à une **thermocline à front plat**, qui sépare la partie supérieure « active » (chaude) de la partie inférieure « passive » (froide ou de même température que le lac environnant).

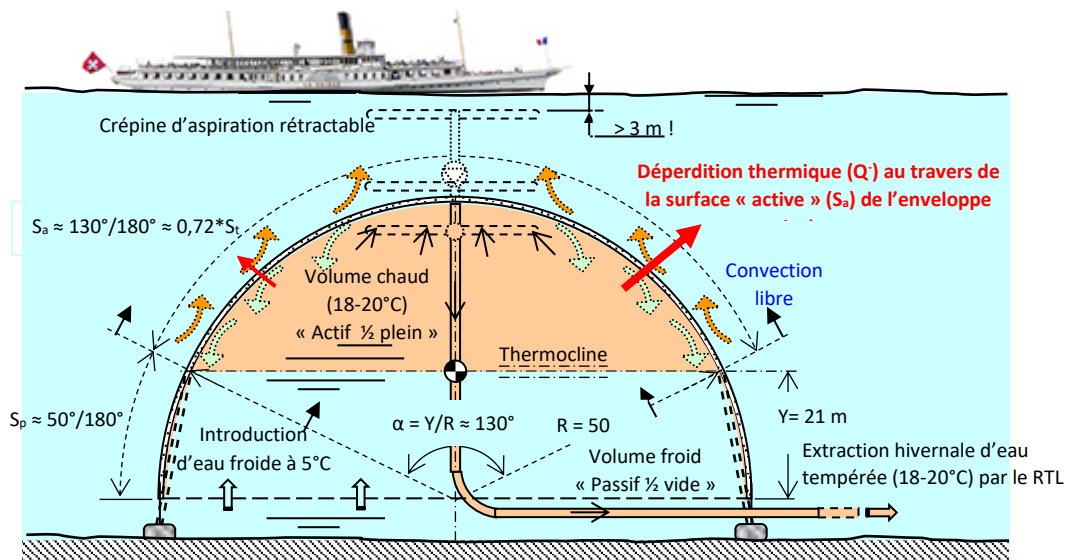


Figure 10.12 : Modèle théorique de la déperdition thermique (Q') du Réservoir sous-lacustre, représenté en valeur moyenne au demi-volume, en phase de Déchargement Hivernal pour le chauffage des immeubles via le réseau de distribution

10.6.4 Calculs théoriques pour le Réservoir réel type ULISSE

Le tableau tronqué 10.13 ci-dessous correspond aux calculs théoriques de la déperdition thermique de l'enveloppe hyperbolique du Réservoir réel type ULISSE ; ceci pour la phase « statique » de Stagnation Automnale (SA) d'une durée de 2 mois (ligne 23, fond gris), suivie de la phase « dynamique » de Déchargement Hivernal (DH) d'une durée de 6 mois.

Plus précisément, la phase DH est calculée ici selon les deux approches : l'une en « valeurs moyennes à mi-volume actif » (ligne 26, fond bleu) et l'autre par « intégration » des sauts du niveau de la Thermocline à front plat ou de l'interface du volume d'eau chaude et froide (lignes 31-81, fond vert).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Calculs théoriques de l'enveloppe hyperbolique du Réservoir ULISSE : 1) en Phase de Stagnation Automnale (plein volume "actif"),													
2	2) en phase de Déchargement Hivernal (par valeurs moyennes à mi-volume "actif" et par intégration des niveaux de la thermocline)													
3	La stratification thermique du réservoir est constituée d'une "Thermocline à front plat", séparant le volume "actif" (chaud) du volume "passif" (froid =Tmoylac)													
4	La déperdition thermique est calculée en valeur moyenne sur le volume "actif" et sur la durée respective des 2 phases (2 et 6 mois)													
5	Rayon de courbure hyperbolique à la base :	Rhb	50	m						Volume total calotte hyperboloïde :	Vcal	253 800	m3	
6	Longueur hyperbolique transversale :	Lht	157,08	m						Volume total réservoir :	Vres	2 005 020	m3	
7	Longueur hyperbolique longitudinale :	Lhl	460	m						Epaisseur isolant (verre cellulaire) :	Eiso	0,05	m	
8	Longueur totale réservoir :	Ltr	560	m						Conductivité totale enveloppe :	λenv	0,066	W/mK	
9	Surface calotte hyperboloïde d'extrémités :	Scal	15 708	m2						Conductivité enveloppe surfacique :	λenvs	1,32	W/m2K	
10	Surface totale enveloppe :	Senv	87 965	m2						Chaleur volumique eau douce :	Cve	1,163	kWh/m3 K	
11	Section hyperbolique transversale :	Sht	3 807	m2						Ecart densité eau stock-lac (ΔT = 15 °K) :	Ds-l	-1,76	kg/m3	
12	Température Hivernal du Lac = température minimale réservoir :	Thlac	5	°C						Débit de Déchargement Hivernal:		457,77	m3/h	
13	Température de Contact du Lac avec le réservoir :	Tcontlac	7,5	°C						(constant)		0,13	m3/s	
14	Température nominale du stock à la fin du Chargement Estival :	Tnomrés.	20	°C										
15	Ecart maximum Température réservoir-lac :	ΔTmax.r-l	15	°K						Charge therm. nominale (Qtn) :		34,98	GWh	
16														
17	Niveau	Longueur	Section	Surface	Volume	Conductance	Temps	Gradient	Gradient	Charge	Perte	Perte	Chute	Température
18	hauteur	hyperbole	transvers	enveloppe	enveloppe	enveloppe	différentiel	thermique	thermique	thermique	thermique	thermique	thermique	finale
19	Thermocline	"active"	"active"	"active"	"active"	"active"		début	final					
20	Ntc	Loha	Seta	Sura	Vola	Conda	td	ΔTdr-l	ΔTfr-l	Qtr	Pte	Pte	ΔTr	Tfr
21	[m]	[m]	[m2]	[m2]	[m3]	[KW/K]	[h]	[°K]	[°K]	[GWh]	[GWh]	[GWh]	[°C]	[°C]
22	Phase (statique) de Stagnation Automnale (plein volume "actif")													
23	0,00	157,09	3 807	87 965	2 005 020	116,11	1 460	12,5	11,79	32,98	2,00	5,71	0,714	19,28596
24														
25	Phase (Dynamique) de Déchargement Hivernal (calculs par valeurs moyennes à mi-volume "actif")													
26	20,66	112,00	1 977	62 715	1 041 383	82,78	4 380	11,79	10,50	31,17	3,81	10,89	1,283	18,00274
27														
28	Phase (Dynamique) de Déchargement Hivernal (calculs par intégration des niveaux de la thermocline)													
29	Ntc	Loh	Seca	Sura	Vola	Conda	td	ΔTdr-l	ΔTmr-l	Qtr	Pte	Pte	ΔTr	Tmr
30	[m]	[m]	[m2]	[m2]	[m3]	[KW/K]	[h]	[°K]	[°K]	[GWh]	[GWh]	[GWh]	[°C]	[°C]
31	2,65	151,42	3 544	84 791	1 866 745	111,92	302	11,79	11,65	32,59	0,39	1,19	0,141	19,14526
32	5,21	145,93	3 306	81 717	1 740 909	107,87	275	11,65	11,53	32,24	0,34	1,05	0,114	19,02308
33	7,67	140,61	3 080	78 739	1 622 170	103,94	259	11,52	11,41	31,94	0,31	0,95	0,110	18,91312
34	10,04	135,46	2 867	75 855	1 510 200	100,13	245	11,41	11,31	31,66	0,28	0,87	0,099	18,81409
35	12,33	130,47	2 667	73 061	1 404 687	96,44	230	11,31	11,22	31,41	0,25	0,79	0,089	18,72492
36	14,53	125,64	2 478	70 353	1 305 329	92,87	217	11,22	11,14	31,18	0,22	0,72	0,080	18,64464
37	16,65	120,95	2 301	67 728	1 211 841	89,40	204	11,14	11,07	30,98	0,20	0,65	0,072	18,57239
38	18,69	116,41	2 134	65 183	1 123 947	86,04	192	11,07	11,01	30,80	0,18	0,59	0,065	18,50741
39	20,66	112,00	1 977	62 715	1 041 383	82,78	180	11,01	10,95	30,64	0,16	0,53	0,058	18,44898
40	22,54	107,72	1 830	60 322	963 896	79,62	169	10,95	10,90	30,49	0,15	0,48	0,052	18,39650
79	54,66	2,00	149	1 120	78 529	1,48	0	10,49	10,49	29,36	0,00	0,00	0,000	17,99316
80	54,68	0,00	149	0	78 538	0,00	4 208	10,49	10,49	29,36	0,00	0,00	0,000	17,99316
81										29,36	3,62	10,34	1,285	
82	[m]	[m]	[m2]	[m2]	[m3]	[KW/K]	[h]	[°K]	[°K]	[GWh]	[GWh]	[GWh]	[°C]	[°C]
83	Ntc	Loha	Seta	Sura	Vola	Conda	td	ΔTdr-l	ΔTfr-l	Qtr	Pte	Pte	ΔTr	Tfr

Tableau.10.13 : - tronqué des calculs théoriques des pertes thermiques de l'enveloppe hyperbolique du Réservoir type ULISSE, pour la phase de Stagnation Automnale et de Déchargement Hivernal

Le cadre supérieur, colonnes-lignes A1 à N15, reprend les paramètres du Réservoir (dimensions, caractéristiques physiques) et ceux du fonctionnement entre le Réservoir et le lac (températures, débits et charge thermique de 35 GWh @ ΔT : 15°K - après - le Chargement Estival Nominal CEN).

→ 35 GWh thermiques ou 126 TJ correspondent à la production annuelle de 70'000 m² de capteur plan solaire thermique (@ 500 kWh/m²-an).

À la fin du Chargement Estival, la valeur du gradient de température, entre le Réservoir et le lac, (I23 : ΔT_{dr-l} = 11,79°K, fond vert) est reprise au départ de la phase du Déchargement Hivernal (H26 et H31).

La température nominale fin CE est de 20°C (H14, fond orange). La colonne N (fond orange), comprend la température fin SA (N23), fin DH (N26) et à chaque niveau de la thermocline du Réservoir (N31-80).

→ La température (variable entre 20 et 18°C) du Déchargement Hivernal conditionne l'efficacité des Pompes à Chaleur (PAC) du chauffage et de production d'Eau Chaude Sanitaire (ECS) des immeubles desservis par les Réseaux Thermo Lacustres (à l'exemple de GeniLac des SIG) !

La colonne G23 à G80 reprend l'intervalle de temps (en heures) de chaque phase, dont celui de chaque niveau de la thermocline du DH (lignes 31 à 80. La **ligne 39 (fond vert)** correspond au stade singulier où la thermocline se situe à une hauteur de 20,7 m au-dessus de la base du Réservoir, soit exactement à la moitié de son volume (§ 5, eq. 5.13).

On observe également au tableau 10.13 :

- **Ligne 23 (fond gris)**, la phase de Stagnation Automnale (1'460 heures ou 2 mois, G23), subit une Perte Thermique Stagnation (PTS) de 2 GWh, soit 5,71 % de la Charge Estivale Nette ou Nominale (CEN : 35 GWh ou 126 TJ).
- **Ligne 26 (fond bleu)**, la phase de Déchargement Hivernal (4'380 h ou 6 mois, G26), calculé par « *valeurs moyennes à mi-volume actif* », subit une Perte Thermique Déchargement (PTD) de 3,81 GWh, soit 10,89 % de la CEN.
- Finalement, entre les lignes-colonnes 31K-L et 81K-L, la phase de Déchargement Hivernal identique mais calculé par « *intégration des sauts du niveau de la thermocline* », subit une Perte Thermique Déchargement (PTD) de 3,62 GWh, soit 10,34 % de la CEN.

Premières conclusions « théoriques » :

- Les deux méthodes du calcul théorique de la phase de Déchargement Hivernal du Réservoir sont logiquement identiques.
- Selon les calculs théoriques, la **Perte Thermique Nette (PTN)**, étant la somme des phases SA et DH, **représente près de 16 % de la Charge Estivale Nominale (CEN) du Réservoir type ULISSE.**

10.6.5 Calculs théoriques pour la Maquette

Le tableau Excel ci-dessous (10.14) correspond aux calculs théoriques de la déperdition thermique de l'enveloppe hyperbolique de la Maquette ; ceci pour la phase « statique » de Stagnation Automnale (SA) d'une durée de **6 minutes** (2 mois réels), suivie de la phase « dynamique » de Déchargement Hivernal (DH) d'une durée de **19 minutes** (6 mois réels).

Plus précisément, la phase DH est uniquement calculée ici selon l'approche en « *valeurs moyennes à mi-volume actif* ». L'autre méthode par « *intégration des sauts du niveau de la thermocline* » n'est pas réalisée étant donné que les résultats des deux méthodes de calcul théorique sont identiques (conclusions précédentes pour le Réservoir).

L'agencement des paramètres de la Maquette, dans le cadre A1 à N15 du Tableau 17.4, sont identiques à ceux du Réservoir au Tableau 17.3. Comme pour le Réservoir, à la fin du Chargement Estival, la valeur du gradient de température (**I23 : $\Delta T_{dr-l} = 11,81^{\circ}\text{K}$, fond vert**) entre la Maquette et la Cuve d'essais (représentant le Lac), est reprise au départ de la phase du Déchargement Hivernal (**H26**). La colonne G23 à G26 reprend le temps (en heures) des phases SA et DH.

On observe également au tableau 10.14 :

- **Ligne 23K-L (fond gris)**, la phase de Stagnation Automnale (0,1065 heures : 23G) subit une Perte Thermique Stagnation (PTS) de 0,07 GWh, soit 5,49 % de la Charge Thermique Nette (CEN : 1,34 kWh ou 4,8 MJ).
- **Ligne 26K-L (fond bleu)**, la phase de Déchargement Hivernal (0.3194 heures : 26G), calculé par « *valeurs moyennes à mi-volume actif* », subit une Perte Thermique Déchargement (PTD) de 0.14 kWh soit 10,46 % de la Charge Thermique Nette (CEN).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Calculs théoriques de l'enveloppe hyperbolique de la Maquette ULISSE :													
2	1) en Phase de Stagnation Automnale (plein volume "actif"), 2) en phase de Déchargement Hivernal (par valeurs moyennes à mi-volume "actif")													
3	La stratification thermique de la maquette est constituée d'une "Thermocline à front plat", séparant le volume "actif" (chaud) du volume "passif" (froid = Tmoylac)													
4	La déperdition thermique est calculée en valeur moyenne sur le volume "actif" et sur la durée respective des 2 phases (6 et 19 minutes)													
5	Rayon de courbure hyperbolique à la base :	Rhb	0,285	m				Volume total calotte hyperboloïde :	Vcal	0	m3			
6	Longueur hyperbolique transversale :	Lht	0,9	m				Volume Maquette :	Vres	0,077	m3			
7	Longueur hyperbolique longitudinale :	Lhl	0,62	m				Epaisseur isolant (verre cellulaire) :	Eiso	0,002	m			
8	Longueur totale réservoir :	Ltr	0,62	m				Conductivité totale enveloppe :	λenv	0,21	W/mK			
9	Surface calotte hyperboloïde d'extrémités :	Scal	0	m2				Conductivité enveloppe surfacique :	λenvs	105	W/m2K			
10	Surface totale enveloppe :	Senv	0,56	m2				Chaleur volumique eau douce :	Cve	1,163	kWh/m3 K			
11	Section hyperbolique transversale :	Sht	0,12	m2				Echelle de temps Réservoir/Maquette : (Tr/Tm) =		13 715	-			
12	Température Hivernale Maquette = température minimale Maquette :	Thlac	5	°C				Débit de Déchargement Hivernal :		0,241	m3/h			
13	Température de Contact de la Cuve avec la Maquette :	Tcontlac	7,5	°C				(constant)		4,018	Lit/min			
14	Température nominale du stock à la fin du Chargement Estival :	Tnomrés.	20	°C										
15	Ecart maximum Température entre maquette et cuve :	ΔTmax.r-l	15	°K				Charge thermique initiale (Qti) :		1,34	kWh			
16														
17	Niveau hauteur	Longueur hyperbole	Section transversale	Surface enveloppe	Volume enveloppe	Conductance enveloppe	Temps différentiel	Gradient thermique début Maquette-Cuve	Gradient thermique final Maquette-Cuve	Charge thermique résiduelle	Perte thermique enveloppe	Perte thermique enveloppe	Chute Température Maquette	Température finale Maquette
18	Thermocline	"active" Loha	"active"	"active"	"active"	"active"								
19		2*√(2ah+h ²)												
20	Ntc		Seta	Sura	Vola	Conda	td	ΔTdr-l	ΔTfr-l	Qtr	Pte	Pte	ΔT	Tfr
21	[m]	[m]	[m2]	[m2]	[m3]	[KW/K]	[h]	[°K]	[°K]	[kWh]	[kWh]	[%]	[K]	[°C]
22	Phase (statique) de Stagnation Automnale (plein volume "actif")							(6 min)						
23	0,00	0,90	0,12	0,56	0,08	0,06	0,1065	12,5	11,81	1,27	0,07	5,49	0,686	19,31430
24														
25	Phase (Dynamique) du Déchargement Hivernal							(19 min)	(calculs en valeurs moyennes à mi-volume "actif")					
26	11,33	0,64	0,09	0,40	0,04	0,04	0,3194	11,81	10,58	1,20	0,14	10,46	1,236	18,07829

Tableau 10.14 : Calculs théoriques des pertes thermiques de l'enveloppe hyperbolique de la Maquette, pour la phase de Stagnation Automnale et de Déchargement Hivernal (en valeurs moyennes)

Selon les calculs théoriques du tableau 10.14 ci-dessus, la **Perte Thermique Nette (PTN) de la Maquette** étant la somme des pertes d'énergie-chaleur des phases SA (5,49 %) et DH (10,46 %), **représente près de 16 % de la Charge Estivale Nette (CEN)**, soit à l'inverse une Efficacité du Stockage Nette de (ESN) de 84 %.

Compte tenu du FET, ce résultat théorique est **identique à celui du Réservoir ULISSE**. Autrement dit, cela semble indiquer que l'on obtient la même efficacité de stockage nette entre le Réservoir et la Maquette à condition de respecter le bon Facteur d'échelle Temporelle FET (13'715).

10.6.6 Bilan théorique et expérimental des pertes thermiques du Réservoir et de la Maquette

Le cadre supérieur (A1 à N23) du tableau 10.15 ci-dessous reprend (aux colonnes C à N), les temps, débits et températures des phases, **CE (fond vert)**, **SA (fond gris)** et **DH (fond bleu)** ; ceci (selon les lignes 6 à 18) pour les différents Essais sur la Maquette et Calculs théoriques avec le Réservoir et la Maquette.

Le cadre inférieur (A20 à N38) reprend, les Charges et les Pertes thermiques, Brutes et Nettes, et inversement l'Efficacité du Stockage Nette, **ESN (fond jaune)**, pour le Réservoir et la Maquette.

La Perte thermique lors du Déchargement Hivernal (**PTD, fond bleu**) est logiquement proportionnelle à sa durée. Cela s'observe particulièrement, pour l'Essai du 24.11.2022, où la PTD est de 18,44 % (**K26**) de la CTN (**D26**), compte tenu d'une durée de 41 minutes (**F6**), soit plus du double de celle normalement requise (19 min) pour respecter le FET.

La PTD de tous les autres essais, y compris les calculs théoriques sur le Réservoir et la Maquette, se situent entre 9,65 % (**K27**) et 12,71 % (**K29**). La Perte Thermique de Stagnation (PTS) est de 5 à 6 %.

En fin de compte global, **l'Efficacité du Stockage Nette (ESN)**, pour le Réservoir et la Maquette, est comprise entre 74,80 % (**N30**) et 89,06 % (**N37**), avec une moyenne de près de 83 % (**N26-N38**).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1			Temps	Temps	Temps	Temps	Débit	Débit	Températ.	Températ.	Maquette	Gain	Chute	Chute
2			Charge	Stagnat.	Décharge	Décharge	Charge	Décharge	Lac	Lac	Début	Températ.	Températ.	Températ.
3					(100% Vol)	(total Q)	(moyenne)	(moyenne)	(Fond)	(moyenne)	Décharge	Chargement	Stagnation	Stagnation
4	Type	Date	tc	ts	tdv	tdq	dc	dd	TLF	TLM	TDD (TFS)	ΔTC	ΔTS	ΔTS/ΔTC
5	Essai/Calcul	[j:m:a]	[min]	[min]	[min]	[min]	[Lit/min]	[Lit/min]	[°C]	[°C]	[°C]	[K]	[K]	[%]
6	Essai Maq.	24.11.2022	14	-	32	41	2,01	2,26	19,7	20,01	35,48	16,17	-	-
7	Essai Maq.	19.12.2022	14	6	19	27	6,07	3,91	17,9	17,98	33,35	16,06	0,83	5,17
8	Essai Maq.	20.12.2022	17	6	25	33	6,21	2,94	18,3	18,69	38,37	21,15	1,29	6,10
9	Essai Maq.	21.12.2022	14	6	19	22	6,12	3,83	18,68	21,6	38,72	21,00	1,21	5,76
10	Essai Maq.	21.12.2022	24	6	19	22	6,15	3,87	20,52	23,02	39,59	19,98	1,13	5,66
11	Essai Maq.	05.01.2023	16	6	19	22	6,02	3,64	13,2	14,68	33,07	20,37	1,04	5,11
12														
13	Cal. Maq.	"Moyenne"	-	6	19	19	-	4,02	5	7,5	19,31	15	0,69	4,60
14	Méthode:	"mi-volume"	[min]	[min]	[min]	[min]	[Lit/min]	[Lit/min]	[°C]	[°C]	[°C]	[K]	[K]	[%]
15														
16	Cal. Rés.	"Moyenne"		[h]	[h]	[h]		[m3/h]	[°C]	[°C]	[°C]	[K]	[K]	[%]
17	Méthode:	"mi-volume"	-	1460	4380	4380	-	457,77	5	7,5	19,28	15	0,71	4,73
18	Cal. Rés.	Intégration	-	1460	4380	4380	-	457,77	5	7,5	19,28	15	0,71	4,73
19														
20			Charge	Charge	Perte	Perte	Perte	Perte	Energie	Perte	Perte	Pertes	Pertes	Efficacité
21			Thermique	Thermique	Thermique	Thermique	Thermique	Thermique	Thermique	Thermique	Thermique	Thermique	Thermique	Stockage
22			Brute	Nette	Chargement	Chargement	Stagnation	Stagnation	Déchargée	Déchargement	Déchargement	Nettes	Nettes	Nette
23			CTB	CTN	PTC	PTC	PTS	PTS	ETD	PTD	PTD	PTN	PTN	ESN
24	Type	Date			(CTB-CTN)	(PTC/CTB)		(PTS/CTN)			(PTD/CTN)	(PTS+PTD)	(PTN/CTN)	(ETD/CTN)
25	Essai/Calcul	[j:m:a]	[MJ]	[MJ]	[MJ]	[%]	[MJ]	[%]	[MJ]	[MJ]	[%]	[MJ]	[%]	[%]
26	Essai Maq.	24.11.2022	5,78	5,21	0,57	9,89	-	-	4,25	0,96	18,44	0,96	18,44	81,56
27	Essai Maq.	19.12.2022	6,98	5,18	1,80	25,84	0,27	5,14	4,47	0,50	9,65	0,77	14,79	86,40
28	Essai Maq.	20.12.2022	9,77	6,82	2,95	30,24	0,42	6,10	5,69	0,71	10,42	1,13	16,52	83,48
29	Essai Maq.	21.12.2022	13,85	6,77	7,08	51,11	0,39	5,78	5,16	0,86	12,71	1,25	18,50	76,29
30	Essai Maq.	21.12.2022	12,67	6,44	6,23	49,16	0,36	5,65	4,82	0,82	12,70	1,18	18,35	74,80
31	Essai Maq.	05.01.2023	9,05	6,57	2,49	27,49	0,33	5,09	5,37	0,77	11,76	1,11	16,85	81,75
32														
33	Cal. Maq.	"Moyenne"		(kWh)			(kWh)	[%]	(kWh)	(kWh)	[%]	(kWh)	[%]	[%]
34	Méthode:	"mi-volume"	-	1,34	-	-	0,07	5,22	1,20	0,14	10,45	0,21	15,67	89,55
35														
36	Cal. Rés.	"Moyenne"	(GWh)	(GWh)			(GWh)	[%]	(GWh)	(GWh)	[%]	(GWh)	[%]	[%]
37	Méthode:	"mi-volume"	35	35	-	-	2,00	5,71	31,17	3,81	10,89	5,81	16,60	89,06
38	Cal. Rés.	Intégration	35	35	-	-	2,00	5,71	29,36	3,62	10,34	5,62	16,05	83,89

Tableau Excel 10.15 : Bilan des pertes thermiques du Réservoir et de la maquette ULISSE
(sur la base des calculs par le modèle théorique et des mesures expérimentales sur la maquette)

Ce premier bilan énergétique, dont les résultats cohérents, montre à priori le bien fondé du *Facteur d'Échelle Temporelle* (FET), celui du *Modèle théorique* du Réservoir et de la Maquette ainsi que celle de leurs *Constantes de temps thermiques* ($\tau_{r/m}$) validées par l'expérience sur la Maquette.

Toutefois, ce bilan énergétique préliminaire est fondé sur l'hypothèse que le Réservoir se comporte exactement comme la Maquette, ce qui reste encore à être démontré avec la simulation numérique complète.

10.7 Simulation numérique du Réservoir type ULISSE et de la Maquette

10.7.1 Généralités

La Simulation numérique, à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics, est la troisième approche pour déterminer les pertes thermiques ou inversement l'efficacité du stockage saisonnier d'énergie-chaleur du Réservoir type ULISSE et de **valider le modèle théorique et expérimentale sur la Maquette**.

À l'issue actuelle de l'étude exploratoire du projet ULISSE, ceci a été réalisée en partie préalablement pour le Réservoir en taille réelle et partiellement pour la Maquette. Ce dernier a été fait dans le cadre du travail de fin d'études de *Master of Science in Engineering* de Mr. Daniel Bello Mendes à l'HEPIA et sous la direction du professeur Roland Rozsnyo.

La Maquette a permis de reproduire physiquement à échelle réduite le cycle annuel de fonctionnement saisonnier, sans et avec injection-extraction sommitale d'eau ; ceci en distinguant une phase « statique » (Stagnation Automnale) et les deux phases « dynamiques » (Chargement Estival et Déchargement Hivernal).

Sur la base des données du Réservoir réel ULISSE et ceux de la Maquette, a eu lieu la modélisation et la simulation numérique des interactions avec l'extérieur (cuve d'essais/lac). La modélisation et la simulation numérique, par éléments finis, devant permettre de comparer l'évolution thermique et la dissipation thermique dudit réservoir. Ladite comparaison a notamment été faite avec les données récoltées par les mesures de températures et de débits réalisées réellement en laboratoire sur la Maquette physique.

Préalablement à ce travail de l'étudiant, le professeur Rozsnyo a exploré une 1^{ère} approche de la modélisation directement du Réservoir en grandeur nature situé dans le lac (Figures 10.16 et 10.17 de gauche).

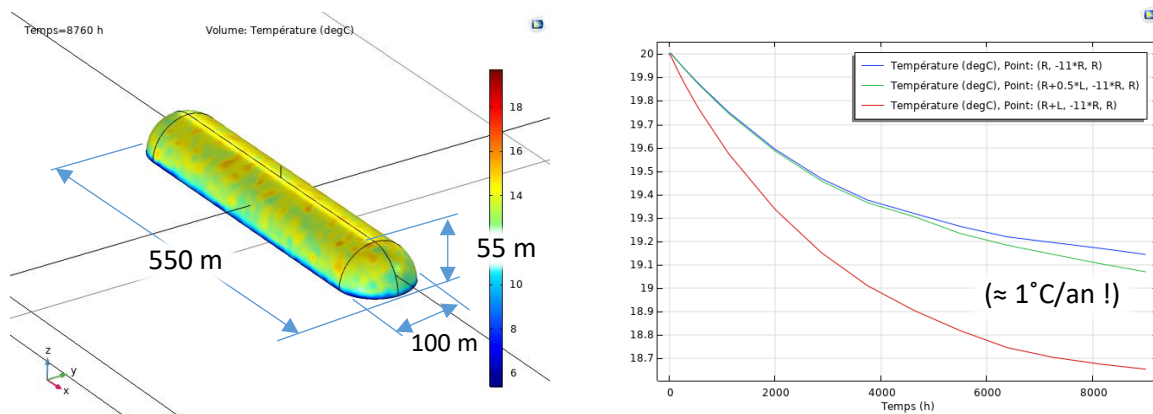
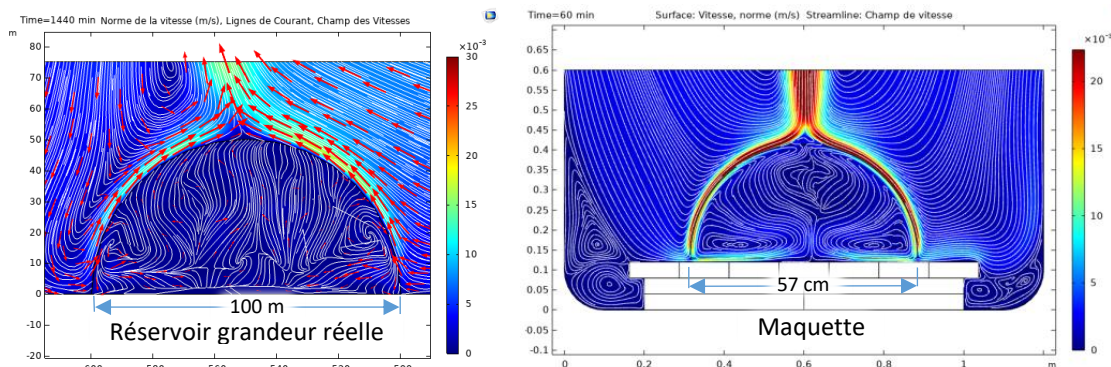


Figure 10.16 : 1^{er} modélisation et simulation numérique du Réservoir ULISSE en taille réelle (2 M m^3) et graphique de points de mesures de la température lors d'un refroidissement « passif » (sans injection ou extraction d'eau) ($\approx 1^\circ\text{C/an} !$)

Des premiers résultats de la simulation numérique, on observe le phénomène de convection thermique à l'intérieur du Réservoir et surtout à l'extérieur, c.-à-d. le lac (fig. 2 à gauche). Ce phénomène est également observé sur la Maquette (fig. 2 à droite). Il montre clairement que la déperdition thermique du Réservoir ULISSE induirait dans le lac des courants de convection sur toute la colonne d'eau sur le pourtour dudit Réservoir.

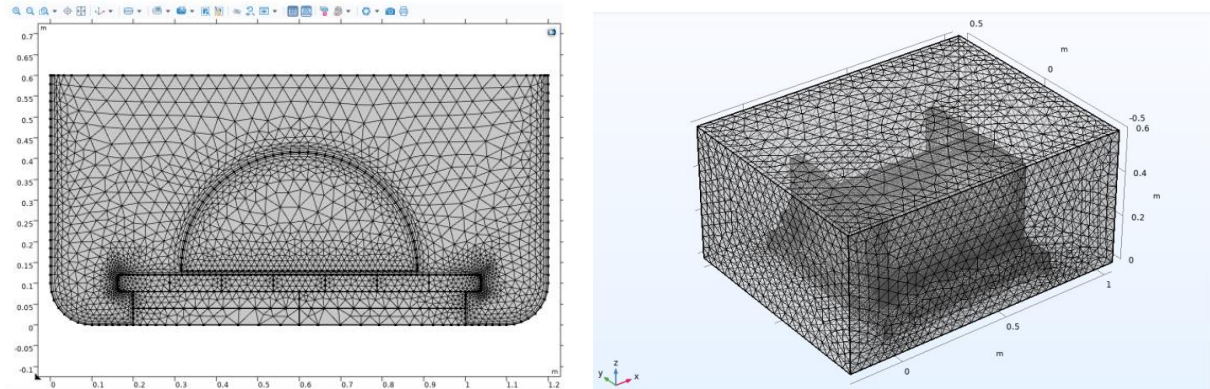


Figures 10.17 : Section transversale avec visualisation de la convection thermique (champs de vitesse de l'eau) à l'intérieur et à l'extérieur du Réservoir ULISSE grandeur nature (figure gauche) et de la maquette dans la cuve d'essais (figure droite)

Si la déperdition thermique est déterminante et à minimiser du point de vue énergétique, celle-ci peut être un aspect environnemental salubre pour favoriser le brassage et l'oxygénation primordiale du fond lacustre ; sujet que l'on reprend dans le chapitre sur l'impact environnemental d'ULISSE (§ 6.4.3.4).

10.7.2 Méthode et maillage pour la simulation numérique

Le solveur COMSOL utilise la méthode des éléments finis. Dans la méthode des éléments finis, on discrétise en général séparément l'espace et le temps : l'espace est subdivisé en éléments géométriques qu'on appelle maillage. En supposant que la solution soit connue aux nœuds d'un élément du maillage, alors la solution numérique sur cet élément s'obtient par interpolation des valeurs connues aux nœuds. C'est la raison pour laquelle les solutions sont dépendantes de la qualité et de la taille du maillage.



Figures 10.18 : Construction automatique du maillage en 2D (gauche) et 3D (droite) par COMSOL pour la Maquette ULISSE

Pour la construction des mailles, COMSOL propose de les construire automatiquement en fonction des physiques utilisés. L'utilisateur peut ensuite modifier la taille des éléments afin de raffiner (ou non) les résultats obtenus. Pour la plupart des cas étudiés, c'est cette méthode automatique de maillage qui est utilisée. Sinon, certains cas physiques peuvent demander de construire le maillage soi-même. Cela permet par exemple d'obtenir une meilleure précision à des emplacements précis du domaine.

Afin de diminuer les temps de calcul de la simulation en 3D, un quart de la Maquette a été modélisé, ce qui a priori n'influence pas les résultats du fait de la double symétrie X, Y.

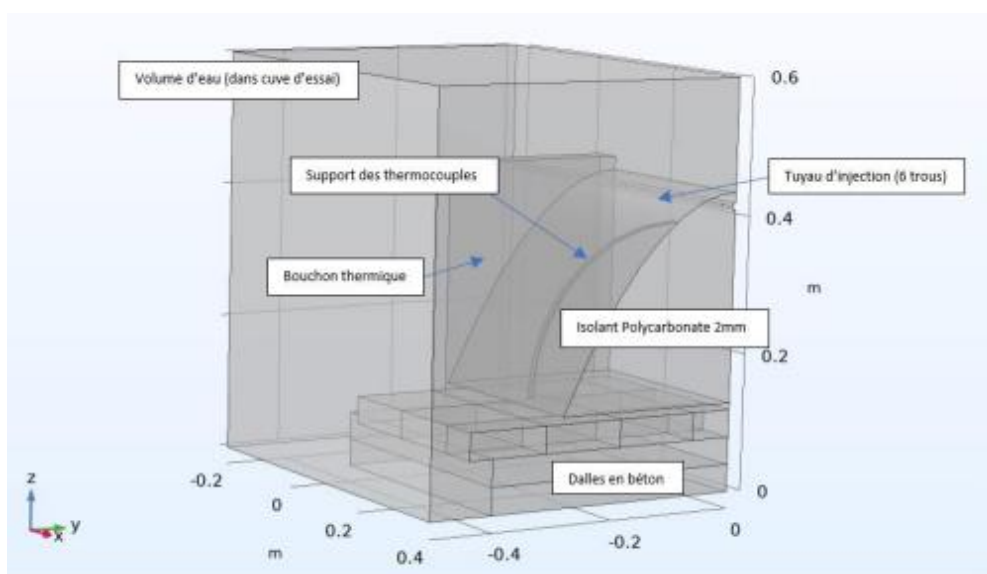


Figure 10.18 : Géométrie numérique en 3D de la Maquette pour le chargement hydrothermique. Seul un quart de la Maquette est représenté (double symétrie)

10.7.3 1^{ers} résultats de la simulation numérique de la Maquette

Les premiers résultats de la simulation numérique de la Maquette montre une relative bonne cohérence avec les mesures expérimentales. La simulation a été faite sur un quart de la Maquette (18.103 litres) pour un volume complet de 72,4 litres. Le temps de chargement est certes beaucoup trop long (64 minutes au lieu de normalement 6 min pour correspondre aux de 2 mois de Chargement Estival). Celui-ci était pris similaire aux premiers essais pour comparaison (avec un débit total limité à 2,2 litres/min) et en raison de la capacité initiale limitée de la pompe de chargement. Normalement pour remplir la maquette en 6 minutes, il aurait fallu disposer d'un débit de 12 litres/min. Toutefois ceci n'a pas réellement d'influence sur le bilan énergétique nette (sans les pertes thermiques de chargement). La perte thermique de la phase CE est moins cruciale car, pour le Réservoir dans le lac, celle-ci peut être compensée « à moindre coût » par l'augmentation du débit ou de la durée de pompage, alimentée par l'excédent d'électricité photovoltaïque, qui sera probablement en surcapacité estivale.

Par contre, les temps de la phase de Stagnation Automnale (SA) de 6 minutes et de déchargement hivernal (DH) de 19 minutes sont eux bien respectés et importants pour établir les pertes durant les phases SA et DH. Cette dernière est simulée numériquement avec un débit d'extraction d'environ 0.95 lit/min (3.8 lit/min pour le volume complet de la Maquette).

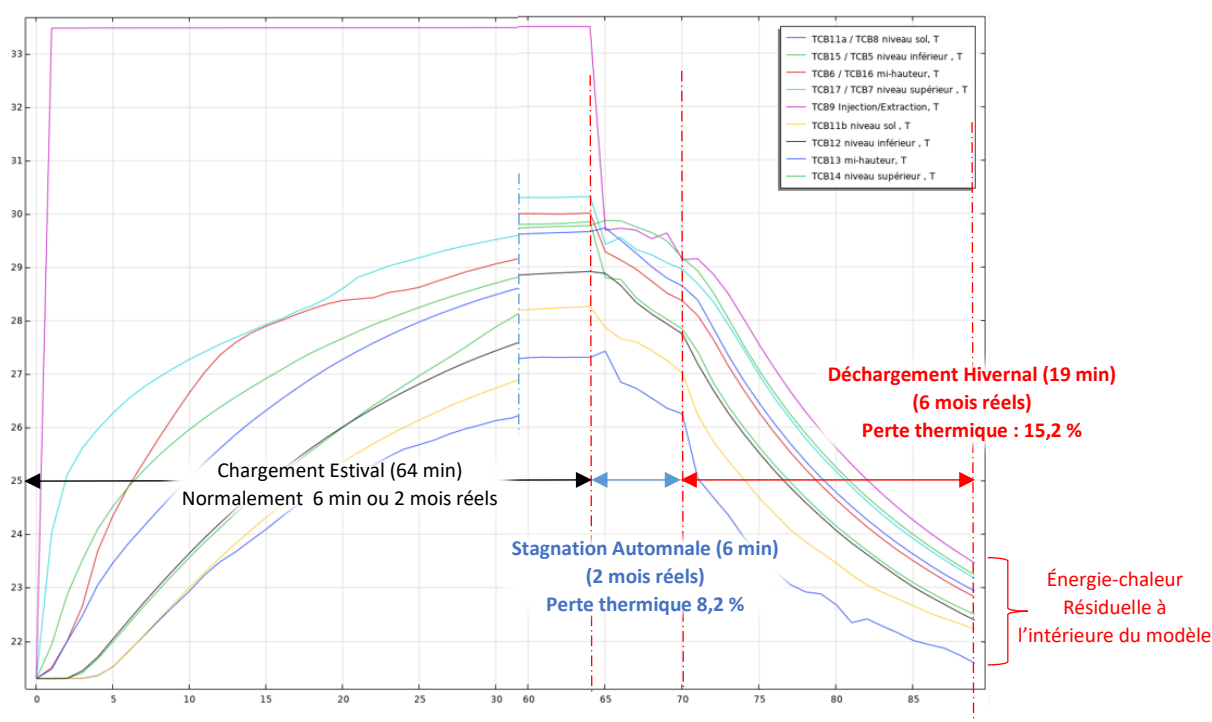


Figure 10.19 : Relevé de température lors du cycle complet de chargement (trop long 64 min.) /stagnation/déchargement réalisé par simulation numérique de la Maquette ULISSE (Efficacité de stockage nette 76.7 % pour l'extraction équivalente au volume de la Maquette en 19 min.). Il reste encore de l'énergie-chaleur dans le réservoir !

La Cuve et la Maquette ont au départ une température commune d'environ 21.3°C. En fin de Chargement Estival la Maquette contient environ 2,79 MJ d'énergie-chaleur nette (0,697 MJ pour le 1/4 de la Maquette). En fin de la phase de stagnation (6 min ou 2 mois réels) l'énergie interne est tombée à 0,615 MJ, soit une perte thermique de 8,2% (contre 5,1 à 6,1% pour essais réels sur la Maquette). En fin de la phase de Déchargement (19 min ou 6 mois réels) l'énergie interne résiduelle est encore de 0,202 MJ.

Compte tenu de l'énergie extraite de 0,461 MJ pour le 1/4 de la Maquette (1,843 MJ Maquette entière), l'efficacité du stockage net est de 76,7 %. Ce résultat se situe dans la fenêtre des résultats des essais réels sur la Maquette et qui se situent entre 74,8 % et 86,4 %. (Tableau 10.15). Un accroissement du débit ou du volume d'extraction permettrait d'augmenter encore le taux de récupération et s'approcher de la valeur supérieure de ladite fenêtre de l'efficacité du stockage de chaleur.

Sur le graphique 10.19 des températures on observe que la stratification se maintient même après les 19 minutes d'extraction équivalente au contenu volumique de la maquette. Ceci s'observe aussi sur la figure 10.20 ci-

dessous. Durant la phase de déchargement il se produit un flux de chaleur à la fois vers le bas ainsi que depuis les dalles en béton représentant le fond lacustre (gradient de couleurs bien visible). Ceux-ci ont emmagasiné de la chaleur durant les phases de chargement et de stagnation. Dans la présente simulation la phase de chargement ayant été 10 fois trop longue (64 au lieu de 6 minutes), ce qui a conduit à un chargement thermique disproportionné du fond en béton.

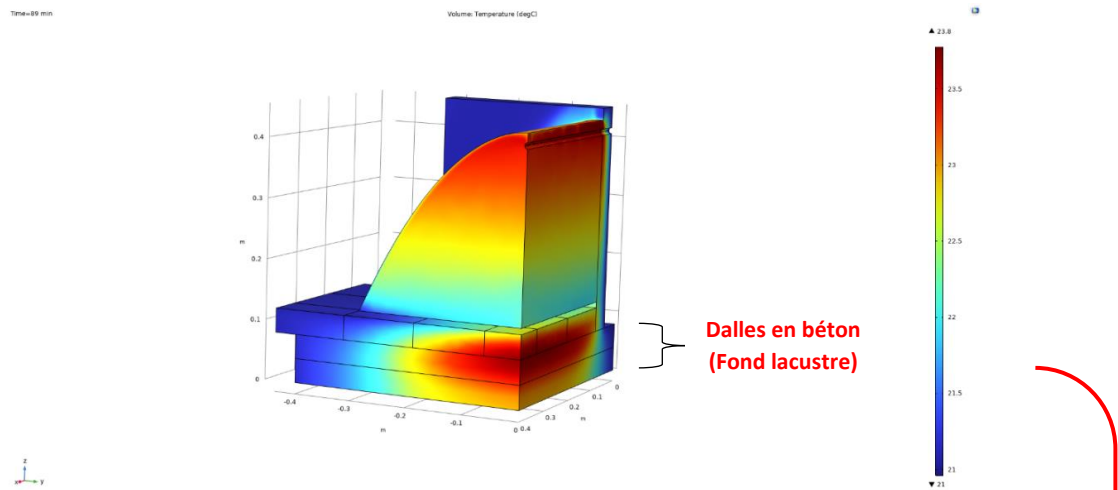


Figure 10.20 : Graphique représentant $\frac{1}{4}$ de la Maquette de la simulation numérique. On observe en fin de déchargement (19 minutes) de l'équivalent du volume d'eau de la Maquette qu'il y a encore un gradient de température dans la Maquette ainsi que dans le sol (fond lacustre). Ceci indique que la Maquette contient encore de l'énergie-chaleur.

Le réchauffement de la dalle du fond s'observe également sur la figure 10.21 ci-dessous et qui correspond au dernier essai sur la Maquette réelle du 5 janvier 2023.

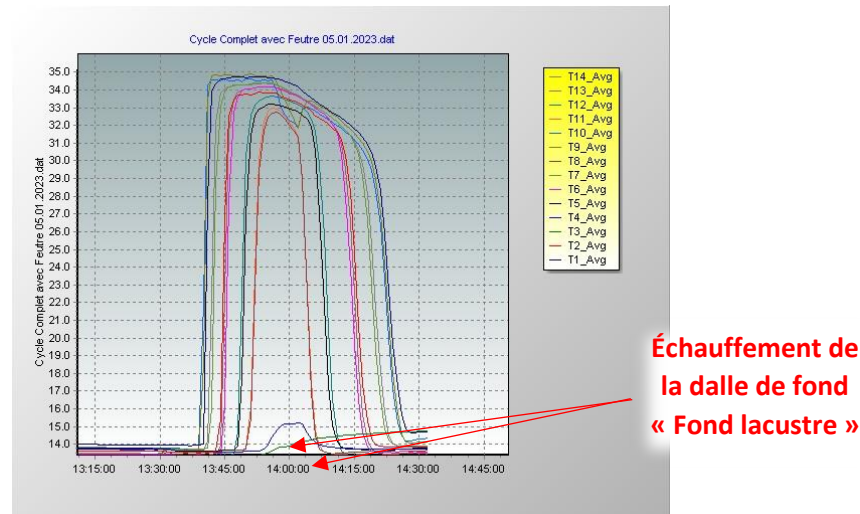


Figure 10.21 : dernier essai physique sur Maquette (cycle complet) du 5 janvier 2023

En conclusion de l'état actuel d'avancement de la simulation numérique et compte tenu des simplifications introduites pour les besoins de la modélisation numérique, celle-ci montre une relative bonne cohérence avec les essais réels réalisés sur la Maquette physique. Ceci aussi bien pour les pertes thermiques de la phase de stagnation que celle du déchargement ainsi que de l'efficacité du stockage thermique saisonnier. Pour le Réservoir réel (grandeur nature) la simulation n'a pas encore été réalisé complètement. Le travail de la simulation numérique devra être poursuivi lors de l'étape suivante, après la présente étude exploratoire du projet ULISSE.

=> Annexe 5 : Simulation of an Under Lake Infrastructure for Capture and Storage of Solar Energy (ULISSE), COMSOL Conférence Munich 2023 [66]

11 Suite : « Feuille de route » du Projet ULISSE & CORSAIRE

Le projet ULISSE associé au free heating CORSAIRE répond à la Stratégie énergétique 2050 de la Suisse. Il permet le développement des Réseaux Thermiques et le Stockage Saisonnier de Chaleur, réduisant le déficit structurel hivernal d'électricité, comme c'est encouragé par le *Forum Stockage d'énergie Suisse* (FESS) de l'aeesuisse. [41]

Le potentiel positif des accumulateurs de chaleur saisonniers a été étudié au sein du *Swiss Competence center for Energy Research* (SCCER) et est poursuivi actuellement dans le cadre du projet SWEET-DeCarbCH.

C'est précisément associé ou dans ce cadre de SWEET-DeCarbCH que pourrait aussi être avantageusement poursuivi le projet ULISSE et ce selon les deux axes suivants :

A. Pour la partie ULISSE :

1. Poursuivre la Simulation Numérique (COMSOL) de la Maquette et celle du Réservoir grandeur nature.
2. Analyser le potentiel réel d'installation des Réservoirs ULISSE (2 M m³) dans les 15 grands lacs suisses.
3. Réaliser une étude d'impact environnemental approfondie pour les lacs concernés.
4. Réalisation d'une étude approfondie du comportement hydrodynamique des Réservoirs vis-à-vis de la courantologie lacustre ; particulièrement l'intégrité structurale des Réservoir face aux seiches internes provoquant des courants internes de cisaillement contraires dans les grands lacs (Annexe : 3).
5. Développement d'un drone autonome pour le nettoyage de l'enveloppe et l'inspection du Réservoir type.
6. Développement d'un 1^{er} prototype du Réservoir de taille intermédiaire pour une première étude de comportement en bassin fermé ou lac.
7. Réalisation et l'installation en situation réelle d'un Pilote d'essais de taille typique (2 M m³) avec observation du comportement physique et environnemental vis-à-vis du lac récepteur.

Proposition

Le Réservoir Pilote et de Démonstration (P+D) d'ULISSE pourrait avantageusement être installé dans le Léman en face de l'EPFL et de l'UNIL et être raccordé à la nouvelle Station de pompage (SPP) des deux campus, pour le refroidissement et le chauffage avec l'eau du lac et les nouvelles pompes à chaleur (PAC) situées dans la centrale thermique (CCT) de l'EPFL !

Le Réservoir Pilote d'ULISSE pourrait être implanté à proximité de la crépine d'aspiration de l'EPFL-UNIL, qui est située à seulement 900 m de la rive où se situe l'SPP et à 75 m de profondeur (idéal pour le Réservoir sous-lacustre). Son raccordement à la CCT permettrait de tester l'impact énergétique sur la performance des PAC.



Figures 11.1 : Proposition d'implantation dans le Léman et de raccordement du pilote ULISSE à l'infrastructure de chauffage et de refroidissement (SPP + CCT) de l'EPFL-UNIL, avec observation environnementale et physique par la plateforme LÉXPLORE.

Objectifs

Un des objectifs du projet d'étude exploratoire ULISSE est d'étudier son impact sur le système de chauffage (100 % thermo-lacustre depuis 2022) de l'EPFL (site principal d'Ecublens) ainsi que celui de l'UNIL en 2025 [59].

Le système de chauffage de l'EPFL-Ecublens est principalement rénové au niveau de la Station de Pompage lacustre des Pierrettes (SPP), de la Centrale Thermique (CCT) avec 4 nouvelles Pompe à Chaleur (PAC), totalisant 24 MW de puissance thermique et à laquelle vient s'ajouter 4 MW du data center placé au-dessus de la CCT [58].

Sur la base du Plan Directeur des Énergies 2015-2045 de l'EPFL, en 2014 le besoin de chauffage du site d'Ecublens était de 34 GWh. Près de 70 % (24 GWh) de la chaleur était extraite du Léman et les 30 % restants fournis par la récupération de chaleur sur les turbines alimentées au mazout. En 2045, le besoin de chauffage du site d'Ecublens de l'EPFL atteindra 50 GWh-t/an (+ 50 % / 2014), fourni depuis 2022 par l'eau du Léman et via 4 nouvelles PAC. Avec un COP annuel annoncé de 5,5 des PAC, leur consommation électrique devrait atteindre près de 10 GWh-é pour extraire du Léman 40 GWh-t/an et les fournir à maximum 67 °C au réseau de chauffage.

L'UNIL projette pour 2025 également de basculer entièrement vers le chauffage de ses bâtiments selon le même système lacustre que l'EPFL (figure 11.2 ci-dessous). Pour l'ensemble du chauffage de l'EPFL + UNIL + Vortex, les besoins en eau du lac s'élèveront en 2030 et 2050 à respectivement 1,7 et 2,35 m³/s, pour 2,5 m³/s de capacité de la nouvelle Station de Pompage des Pierrettes (SPP).⁹

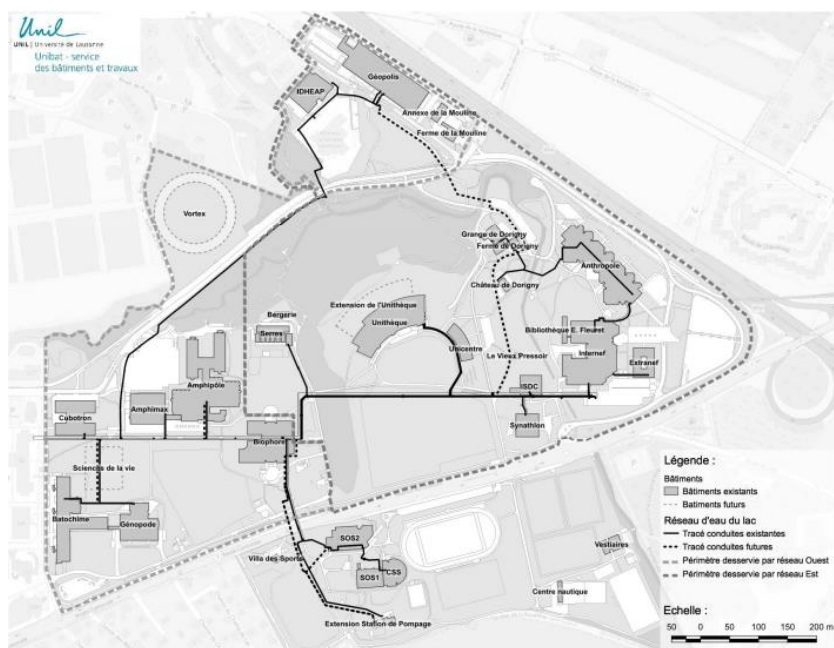


Figure 11.2 : Carte du campus de Dorigny avec en pointillé noir les conduites qui seront ajoutées dans le cadre du projet d'extension de la station de pompage et d'adaptation du réseau (source : Canton de Vaud, EXPOSE DES MOTIFS ET PROJET DE DECRET - pour financer l'agrandissement de la station de pompage et l'adaptation du réseau de distribution d'eau du lac alimentant le Campus de Dorigny, juillet 2019).

Avec ces débits d'eau lacustre et un COP des PAC identique (5,5) pour l'EPFL et l'UNIL, l'énergie thermique pour le chauffage des deux hautes écoles pourra atteindre respectivement 60 GWh-t @ 1,7 m³/s en 2030 et 80 GWh-t @ 2,35 m³/s en 2050.

La consommation électrique des PAC atteindra alors aussi respectivement 11 et 15 GWh. Auquel il faut ajouter celle des pompes de circulation primaire de la SPP, pour l'élévation de la masse d'eau pompée : 0,8 GWh pour 14 M m³ en 2030 et 1 GWh pour 19 M m³ en 2050 ainsi que les pertes de charge (?) dans le réseau hydraulique entre les crépines d'aspiration d'eau, l'évaporateur des PAC et jusqu'au point de rejet dans la rivière Sorge.

Paramètres thermiques principaux EPFL-UNIL sans et avec ULISSE :

Température (hivernale) source froide du lac Léman (T_f) : 5 à 6 °C

Température (hivernale) source ULISSE (T_u) : 18 à 20 °C

Température de rejet d'eau en sortie de l'évaporateur des PAC (T_r) : 2 à 4 °C

Différence de température sur l'évaporateur des PAC (sans) ULISSE (ΔT_{f-r}) : 3 K

Différence de température sur l'évaporateur des PAC (avec) ULISSE (ΔT_{u-r}) : 15 K

Température maximum de distribution de l'eau en sortie des PAC (réseau de chauffage) : 67 °C

⁹ 159 TexteCE crédit SPP campus UNIL.pdf (Canton de Vaud, juillet 2019)

En première approximation, en se basant sur l'étude d'impact d'ULISSE sur Genilac (§ 5), qui indique un gain potentiel de 50 % sur le COPsys, le système de chauffage des campus EPFL + UNIL + Vortex pourrait bénéficier d'une réduction de 50 % (6 à 8 GWh-é/an) de la consommation électrique (SPP + CCT), pour fournir les 60 à 80 GWh-t (2030/2050). Ceci selon un quintuple impact énergétique positif :

1. Réduction (facteur 5 ou – 80 %) du volume/masse et donc du débit d'eau pour extraire du lac la chaleur nécessaire aux besoins de chauffage de l'EPFL,
2. Réduction (~ 95 %) des pertes charges (proportionnelles au carré du débit) et l'énergie correspondante de pompage de l'eau du lac au travers des évaporateurs des PAC,
3. Réduction (~ 80%) de l'énergie potentielle d'élévation de la masse d'eau du lac vers les PAC,
4. Augmentation (+ 50 %) du Coefficient de Performance (COP) des PAC, ou réduction de l'énergie électrique correspondante absorbée,
5. Réduction de la demande et des pertes thermiques au niveau de la consommation d'eau potable durant la saison de chauffage par le free heating CORSAIRE : 125 à 175'000 m³ @ $\Delta T_{ep} \approx 10$ K, => fourniture en « free-heating » (sans PAC) = 1,5-2 GWh (2030-2050).

Observation physique environnementale du Réservoir Pilote d'ULISSE

Les observations physiques du Réservoir sous-lacustre ainsi que de son impact environnemental pourraient avantageusement être réalisées avec la plateforme de recherche LÉXPLORE. Celle-ci est depuis 2018 et pour 8 ans ancrée (110 m de fond, 570 m de la rive) sur le lac Léman en face du port de Pully (VD) et à 6 km du campus lausannois.



Photo <https://lexplore.info/fr>

Figure 11.2 : Plateforme LÉXPLORE de recherche lacustre sur le Léman, actuellement ancrée en face du port de Pully (VD)

B. Pour la partie free heating CORSAIRE :

Comme évoqué précédemment, au chapitre § 2.1, **le projet CORSAIRE fut inscrit au Plan directeur cantonal de l'Energie de Genève (2001-2005) [46]**. En novembre 2005 avait débuté le « Volet-1 » de l'étude d'impacts pluridisciplinaires sur un **immeuble pilote d'habitation mis à disposition par la Ville de Genève**. Hélas elle fut subitement arrêtée 3 mois plus tard au motif d'une restriction budgétaire imprévue (réduction de la dotation de la Confédération pour l'OCEN, alors que le « Volet-1 » CORSAIRE était entièrement financée par l'OCEN).

Et pour rappel (§ 2.1), depuis ce temps-là (2006), la Ville de **Toronto applique (en été, à défaut de chaleur en hiver) exactement le free heating CORSAIRE** sur son Réseau d'Eau Potable, avec les 360 MW de rejets thermiques de la climatisation de **plus de 80 buildings du centre-ville, comprenant hôpitaux, bâtiments gouvernementaux, les data-centres, les universités, tours commerciales et résidentielles** ! [51, 51, 52].

Dans le cadre de la Stratégie Énergétique Suisse 2050 et en réponse à l'appel à projet SOUR de l'OFEN, le présent projet ULISSE associé à l'intégration du procédé free heating CORSAIRE, devrait reprendre l'ensemble du projet CORSAIRE, inscrit et initié officiellement à Genève mais en souffrance depuis 2005.

Les Services Industriels de Genève (SIG) sont à la fois en charge du Réseau public d'Eau Potable (REP) du canton de Genève et totalement impliqués dans le projet GeniLac, « *Vaisseau amiral* » des RTL en Suisse. Pour cela, il y aurait lieu de reprendre les points suivants :

1. L'étude de base (travail de master W. van Sprolant EPFL 1995).
2. L'étude de la déperdition thermique du Réseau public d'Eau Potable (REP).
3. L'étude de l'intégrité physique du REP (sous free heating hivernal).
4. L'étude d'intégrité sanitaire de l'eau potable sous correction hivernale de sa température.
5. L'étude psychosociologique sur l'acceptation publique de la modification hivernale de la température de l'eau potable au robinet.
6. **L'étude d'impact(s) du free heating CORSAIRE sur un immeuble pilote et de démonstration (P+D).**

Proposition

Pour réaliser efficacement une **étude pluridisciplinaire d'impacts du free heating CORSAIRE sur un parc immobilier représentatif du potentiel à l'échelle d'une agglomération urbaine**, il y a lieu de choisir un grand ensemble d'immeubles, au moins équivalent à un quartier d'habitation et avec des commerces divers (bon foisonnement par le nombre important d'usagers domestiques de l'eau potable).

Pour tester simultanément le transfert de chaleur de la source de rejets thermiques vers le REP, il serait utile qu'il soit proche des immeubles concernés. Ceci rend aussi plus pratique les opérations de conduite des études pluridisciplinaires dans un périmètre limité. La Cité du Lignon, avec ces 2'780 logements, 6'500 habitants, commerces divers et à quelques centaines de mètres de la STEP d'Aïre, pourrait être un site Pilote et de Démonstration idéal.



Figure 11.3 : La Cité du Lignon « le plus long bâtiment d'Europe » (1 km)

Initialement, sous mandat du ScanE (OCEN), l'étude d'impact(s) prévue en 2005 sur l'immeuble de la Ville de Genève (87 rue de la Servette) était la première étape sur les 8 que prévoyait le projet CORSAIRE [46]. **Pour l'expérimentation et l'observation énergétique de l'immeuble pilote**, celui-ci devait être instrumentalisé au niveau global de l'installation énergétique de l'immeuble, des équipements collectifs (buanderies) mais aussi plus individuellement sur un certain nombre d'appartements représentatifs, comprenant aussi des compteurs d'eau et d'énergie sur les appareils électroménagers (lave-vaisselles, lave-linges).

Du fait de l'absence d'une source de rejets de chaleur appropriée, la correction de la température de l'eau potable froide à l'entrée de l'immeuble était réalisée dans le local de la chaufferie de l'immeuble (pour la Cité du Lignon ce serait fait dans la STEP d'Aïre). Les mesures énergétiques étaient prévues sur deux semestres d'hiver de façon comparative (avec/sans CORSAIRE). Il était aussi prévu de tester une procédure par « alternance journalière », c'est-à-dire de corriger artificiellement un jour sur deux la température de l'eau froide, de façon à supprimer statistiquement des variables externes tel que par exemple les degrés-jours de chauffage, des changements de locataires, etc. Le **suivi énergétique** était réalisé par Amstein+Walthert SA & CvS énergies sàrl.

Simultanément à l'expérience énergétique sur l'immeuble était prévu un **suivi sanitaire de la qualité de l'eau potable durant l'expérience** (analyses microbiologiques) par le Laboratoire AMICO Lab SA à Genève (Carouge) et sous la supervision de la Fondation Hygie Europe.

De même, une **étude psychosociologique** menée par la société Et Alii à Genève, était prévue de manière exploratoire (externe à l'immeuble, échantillon représentatif de la population genevoise) et en observation interne à l'immeuble auprès des usagers en situation ; afin d'évaluer l'acceptabilité des consommateurs « captifs » du réseau public d'eau potable.

Finalement, une **stratégie de Communication** était aussi planifiée par TerraWatt (Vessy), pour assurer la Communication de l'information auprès des locataires de l'immeuble pilote et de SIG (en cas d'appel téléphonique d'un locataire « dérouté »).

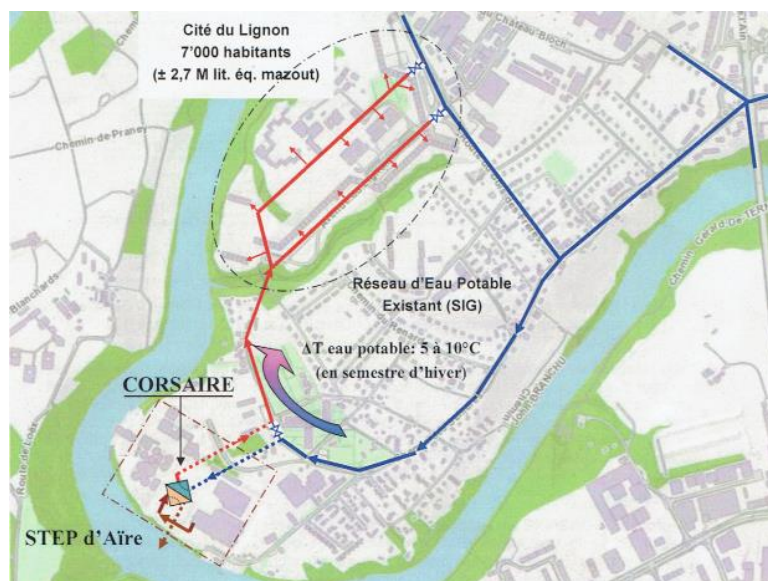


Figure 11.4 : Proposition de la Cité du Lignon à Genève raccordée à la STEP d'Aire comme Pilote d'étude pluridisciplinaire d'impacts du free heating CORSAIRE

STEP Aïre

La principale Station d'épuration des eaux usées de Genève sinon de Suisse, la STEP Aïre, avec ses 140'000 m³/j et 2 m³/s, est l'exemple même de source idéale de rejets de chaleur à basse température pour le free heating CORSAIRE [65]. Pour autant que le Réseau d'Eaux Usées (REU) est « séparatif » de celui des eaux de pluie et outre la capacité des bassins d'eaux usées, ces dernières sont logiquement en phase avec la consommation d'eau potable. Après traitement ces eaux ont encore une température supérieure à celle du réseau d'eau potable (REP) en semestre d'hiver, d'autant plus que les bassins de la STEP d'Aïre sont totalement couverts. Le transfert de chaleur vers le REP peut alors se faire simplement en *free heating* (sans pompe à chaleur) à l'aide d'une batterie d'échangeur de chaleur. La distance de la STEP d'Aïre est à seulement quelques centaines de mètres de la boucle du REP qui alimente la Cité du Lignon (Fig. 11.4 ci-dessus).

Pour l'Histoire

Avant le développement des réseaux électriques, l'emblématique **Jet d'eau de Genève** est à l'origine d'une co-fourniture d'eau et d'énergie mécanique par le réseau d'eau potable (**Eau motrice**) pour alimenter les machines des artisans genevois de 1886 à 1960. D'une certaine manière, le free heating CORSAIRE, en co-fournissant de l'énergie-chaleur par le réseau public d'eau potable, pourrait renouer Genève avec son Histoire industrielle et artisanale...

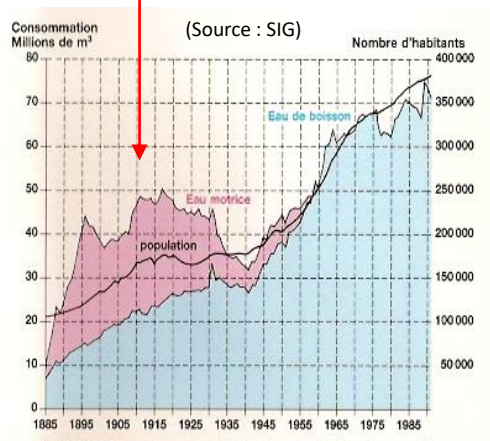


Figure 11.5 : Le premier jet d'eau de Genève à l'emplacement de l'usine de la Coulouvrenière
© Livre « Genève – Passé et présent sous le même angle » de Nicolas Crispini et Jean-Claude Mayor

12 Conclusions générales et suite

Le présent rapport final a porté sur l'étude exploratoire du système/projet ULISSE (*Under Lake Infrastructure for capture and Storage of Solar Energy*). L'étude a été subventionnée par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), suite à l'appel à projets « SOUR Call 1-2021 » (*SWEET Out the box Rethinking*) dans le cadre de la Transition énergétique 2050 de la Suisse. L'étude a eu lieu à l'institut hôte HEPIA, Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève, de septembre 2021 à fin mai 2023.

Constat

Face aux changements climatiques la *Stratégie Énergétique Suisse (SES-2050)*, qui vise une « double neutralité » : Nucléaire & Carbone » (2035-2050), prévoit d'ici à moins de 30 ans un déficit structurel en semestre hiver de 9 TWh d'électricité ; l'équivalent à la capacité nationale d'accumulation hydroélectrique.

Cette situation résulte du retrait planifié de l'électricité nucléaire en 2035 et de l'augmentation de la demande d'électricité, pour la Climatisation, la Mobilité électrique et les pompes à chaleur (PAC) destinées au Chauffage du bâti (en substitution des carburants et des combustibles fossiles).

L'enjeu majeur de la SES-2050 est donc de disposer de suffisamment d'électricité « doublement neutre » en hiver, avec un prévisible manque d'importation, soit par une production indigène accrue (avec stockage saisonnier), soit par une réduction de la demande (notamment par l'amélioration de l'efficacité de son usage).

Une production annuelle accrue d'électricité indifférenciée pourrait revenir à une « fuite en avant » :

- Encore davantage de photovoltaïque aux 34 TWh déjà planifiés pour 2050, pour ne disposer naturellement en semestre d'hiver que de 30 % de la production annuelle, ne ferait qu'accroître le risque de devoir recourir au paradoxal « *solar peak shavings* » estival.

- Un développement accru de la capacité d'accumulation hydroélectrique est limité par le nombre de sites potentiels acceptables. S'ajoute à cela la problématique du chargement estival des barrages en eau sous le stress hydrique due au réchauffement climatique. D'une manière générale, l'exigence de l'augmentation des « débits résiduels » réduiront la productivité hydroélectrique. Le potentiel de développement d'ici 2050 de la production annuelle d'hydroélectricité est de 1 à 3 TWh (équivalent au complexe de Grande-Dixence), sauf que la disponibilité en semestre d'hiver n'est au mieux que de la moitié soit environ 1,5 TWh...

- **Le maintien de l'énergie nucléaire accentuerait encore le stress hydrique sur les cours d'eau déjà impactés par le réchauffement climatique.** Pour des raisons technico-économiques, une centrale nucléaire fonctionne généralement en « ruban » toute l'année, donc également en semestre d'été (≈ 4'000 h) [18, 19]. La centrale nucléaire suisse de Leibstadt, durant le seul semestre d'été, rejette sous forme de vapeur d'eau 14 millions de m³ extrait du Rhin (32 PJ de chaleur équivalent à sa production électrique annuelle de 9 TWh). La centrale nucléaire de Gösgen n'est pas en reste avec près de 10 millions de m³ d'eau évaporées de l'Aar au même moment. Avec l'accroissement de la sécheresse estivale, exacerbée encore avec les canicules plus récurrentes, les besoins accrus d'eau pour d'autres usages, dont notamment l'agriculture, deviendront (sont déjà) critiques. Dès lors, les centrales thermoélectriques (nucléaires mais aussi à flamme, charbon, fioul ou gaz) qui ne pourront pas fonctionner sans pertes d'eau de refroidissement (en valorisant leurs rejets thermiques par la cogénération), seront contraintes d'arrêter ou de réduire fortement leur production en semestre d'été et ne seront donc plus économiquement « compétitives » et a fortiori non plus présentes en semestre d'hiver. La France et l'Allemagne, principaux importateurs en Suisse d'électricité hivernale, ont le même problème de disponibilité électrique et d'engagement climatique ...

Proposition

A cette problématique multifactorielle, le système/projet ULISSE, appuyé par le *free heating* CORSAIRE, est proposé ici comme une partie de solution potentielle. En appui à la Stratégie énergétique 2050 de la Confédération, **ULISSE vise à optimiser (booster) les réseaux hydrothermiques des grands lacs suisses tout en protégeant ces lacs des effets du réchauffement climatique.** Ceci en améliorant l'efficacité électrique pour le chauffage par pompe à chaleur et la climatisation en *free cooling* ainsi qu'associé au *free heating* CORSAIRE pour réduire l'impact énergétique négatif de la baisse hivernale de la température du réseau public d'eau potable (2 voies de capture, de stockage et de valorisation de l'énergie solaire thermique ainsi que de rejets de chaleur).

Le système ULISSE propose en premier lieu de fournir une source thermo lacustre hivernale d'environ 20°C, supérieure à celle d'ordinaire à 5-6°C, ce qui va doubler l'efficacité des pompes à chaleur (PAC) et réduire de moitié leur consommation électrique ainsi que réduire de 95% l'énergie de pompage et de circulation de l'eau dans lesdits réseaux RTL.

Cette source de chaleur ULISSE est constituée de grands Réservoirs « tunnels » (longueur 560 m x 50 m de rayon transversal hyperbolique), ancrés sur les fonds lacustres, d'un volume de stockage unitaire de 2 millions m³ et d'une capacité thermique de 125 TJ chacun. Ces Réservoirs ULISSE sont chargés en été d'eau tempérée, soit issue de la couche supérieure du lac (*Épilimnion*) chauffée par le soleil, soit par des rejets de chaleur industrielle et de climatisation. Les pompes de chargement sont alimentées par de l'électricité photovoltaïque absorbant les pics de production estivale des installations photovoltaïques (PV) et évite le recours à leurs dits *peak-shavings*.

La deuxième voie d'utilisation de l'eau tempérée fournie par les Réservoirs ULISSE ou d'autres rejets thermiques est, par le procédé CORSAIRE, de corriger (dégeler +5 à +10°C) la température hivernale des Réseaux publics d'Eau Potable (REP). Les REP concernés sont ceux voisins aux RTL ainsi que ceux qui ne sont pas desservis par un RTL. A l'instar du « free cooling » pour la climatisation, le « free heating » CORSAIRE utilise uniquement un échangeur de chaleur comme un « toboggan » thermique. Il peut fournir via les REP 30 % de l'énergie pour l'ECS et augmenter l'efficacité électrique des RTL ainsi que toutes les PAC pour l'ECS même en dehors des réseaux RTL.

Le concept/projet ULISSE, avec environ 300 Réservoirs répartis de façon invisible dans les 15 grands lacs suisses et en association avec le *free heating* CORSAIRE (y compris hors régions lacustres), pourrait fournir près de 60 PJ ou 30 % des 200 PJ de besoins nationaux d'énergie-chaleur pour le chauffage ambiant et l'ECS. Ceci permettrait d'économiser 3 TWh-e d'électricité brute en semestre d'hiver (1/3 des 9 TWh de déficit hivernal d'électricité ou l'équivalent du double de la production hivernale du complexe hydroélectrique de Grande Dixence : 1,5 TWh).

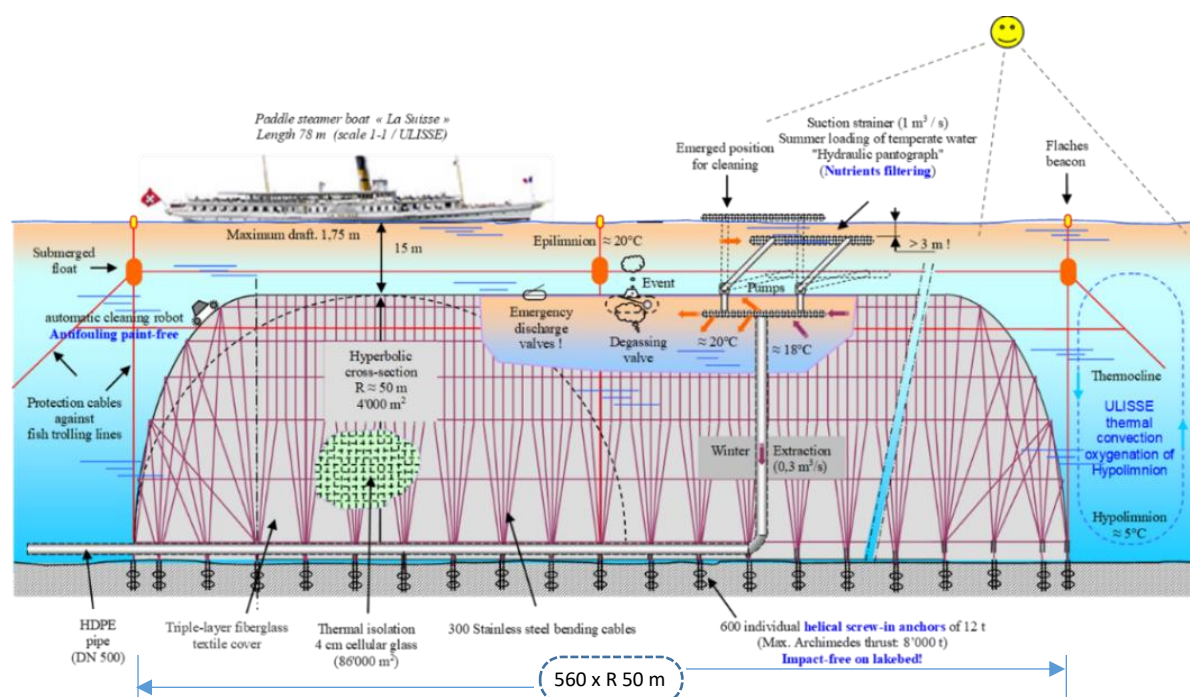


Fig. 2.1 : Schéma longitudinal tronqué d'un Réservoir type d'ULISSE de 2 M m³ (Bateau de la CGN à l'échelle)

Les courants de convection thermique externes induits par les Réservoirs ULISSE peuvent améliorer la circulation des nutriments et l'oxygénation des fonds lacustres, **protégeant l'écosystème aquatique contre son eutrophisation accentuée par le réchauffement climatique**. En outre, la présence des Réservoirs peut créer des niches écologiques protégées de la pêche et ainsi favoriser le développement de la faune aquatique. Le captage sélectif (filtration du phytoplancton) permettrait de réguler si besoin les « blooms » (efflorescences algales toxiques), de récupérer les GES et le CH₄ (usage énergétique). Le confinement de la chaleur captée dans les Réservoirs ULISSE ferait baisser la température superficielle des lacs et par là les pertes d'eau par évaporation et ferait augmenter l'oxygène dissous dans l'eau.

Approche et méthodologie et résultats de l'étude exploratoire du projet ULISSE

Après l'analyse de la Stratégie énergétique de la Suisse 2050 et la présentation du projet ULISSE avec l'historique du concept initial (CORSAIRE-ULISSE), a été développé le fonctionnement avec le Réseau Thermo Lacustre (RTL) ainsi qu'avec le Réseau urbain d'Eau Potable (REP). Ensuite, l'ensemble a été appliqué et quantifié sur le plus grand réseau RTL de Suisse, « GLN - Genilac » et le REP du canton de Genève.

Pour établir les impacts, il a été tenu compte de l'évolution climatique et celle de l'efficacité énergétique du bâti d'ici à 2050 (ECEEB-2050). **Il a aussi été considéré à terme une généralisation (indispensable) de l'alimentation des appareils électroménagers avec l'Eau Chaude Sanitaire (ECS).** On a observé que ceci modifie l'indice de dépense de chaleur pour le chauffage et l'ECS et ouvre la perspective économique d'une extension des RTL.

L'application pour Genilac a montré que la fourniture en semestre d'hiver de 250 GWh de chaleur nécessiterait (au lieu de 60 M m³ à 6,5°C) seulement 1/5 ou 12 M m³ d'eau lacustre à 19°C, venant de 6 Réservoirs ULISSE ancrés au fond du *Petit lac* Léman à 6 km de la Station de pompage lacustre SPL du Vengeron. En combinaison du *free heating* CORSAIRE, l'énergie électrique hivernale du réseau RTL Genilac pour le Chauffage Ambiant et l'ECS diminue de 50 %. Pour Genilac et le canton de Genève, cela correspond à l'économie hivernale d'électricité de 40 GWh-é soit près de 20 % de la production hivernale de la centrale hydroélectrique de Verbois sur le Rhône.

Dans un troisième temps, l'étude exploratoire a analysé plus précisément la forme et la structure de l'enveloppe principale (verre textile et cellulaire biocompatible) du Réservoir ULISSE ainsi que son ancrage (*Screw-in Anchor*) à très faible impact sur le fond lacustre. La détermination de l'efficacité du stockage saisonnier de chaleur du Réservoir ULISSE a été réalisée selon 3 approches : 1) par calculs sur modèle théorique, à la fois du Réservoir à taille réelle et de la Maquette à échelle réduite, 2) par mesures réalisées en laboratoire sur ladite Maquette, 3) sur la base d'une simulation numérique. Au préalable a été établi le *Facteur d'échelle Temporelle* (FET = 13'715) entre la Maquette et le Réservoir réel, ce qui a permis de déterminer la durée des différentes phases du cycle annuel de leur fonctionnement respectif.

Les résultats des trois approches convergent avec très peu d'écarts (quelques %). **L'Efficacité énergétique du Stockage saisonnier Nette de chaleur (ESN) du Réservoir type ULISSE est d'environ 84 %.** Elle part de la fin du *Chargement Estival* (CE : 2 mois de Réservoir réel / 6 minutes de Maquette), la phase de *Stagnation Automnale* (SA : 2 mois / 6 minutes) et celle du *Déchargement en semestre d'Hiver* (DH : 6 mois / 19 minutes).

La convergence des résultats confirme aussi la bonne valeur du FET et que la température moyenne fournie aux réseaux RTL par les Réservoirs ULISSE pourra être à minima de 19-20 °C (chargement initial à 20-23°C par rapport à une température sommitale du lac : ≥ 25°C à l'été 2050). Ceci détermine l'efficacité des RTL avec ULISSE.

Le coût financier du système ULISSE & CORSAIRE pour la Suisse a été estimé sous réserve compte tenu de l'absence d'un précédent. Toutefois la présente étude exploratoire a permis d'esquisser un ordre de grandeur **de 3 à 4 milliards de CHF** sur la base des plus grandes réalisations au Monde en matière de stockage saisonnier de chaleur sensible. Le coût du système ULISSE est à mettre en perspective avec des solutions alternatives (pour autant qu'elles soient réalisables) ; qui seraient de 19 milliards CHF pour une capacité de production hydroélectrique hivernale supplémentaire de 3 TWh-é ou de l'ordre de 7 milliards CHF pour une alimentation de 60 PJ d'énergie solaire thermique par des réseaux de chaleur, comprenant 35 km² de capteurs thermiques plan, de 26 M m³ de bassins couverts de stockage saisonnier et 91 km² de surface de terrain (= surface du lac de Zurich).

De la présente étude exploratoire du système ULISSE, il ressort que l'impact environnemental n'est probablement pas neutre mais pourrait potentiellement même être positif, notamment en offrant une protection contre les effets négatifs du réchauffement climatique. Concernant la cohabitation des Réservoirs ULISSE ancrés sur les fonds lacustres, avec les « habitants » et les usagers des lacs, on peut considérer qu'il n'y a pratiquement aucun impact pour la navigation et que la perte de 0,8 % de la surface de pêche peut être compensée par la protection environnemental qu'apporte ses Réservoirs ULISSE (développement des poissons).

Suite

Finalement, la présente étude exploratoire d'ULISSE, associé au *free heating* CORSAIRE, propose une « feuille de route » d'approfondissement et de validation du projet, avec notamment deux principaux objectifs d'étape ; un **Réservoir ULISSE pilote** (relié aux RTL des campus EPFL-UNIL avec observations par le laboratoire flottant LÉXPLORE) et un **pilote CORSAIRE** (Cité du Lignon, 6'500 habitants et commerces avec la STEP d'Aire à Genève).

13 Références bibliographiques

Stratégie énergétique Suisse 2050

- [1] Perspectives énergétiques 2050+, Rapport succinct, Office fédérale de l'énergie (DETEC/OFEN 2020)
- [1.1] Energie Panorama Office fédéral de la statistique, mars 2020
- [1.2] Stratégie Chaleur Suisse 2050, OFEN
- [2] Monitoring Stratégie énergétique 2050, Rapport de monitoring 2021
<https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/versorgung/statistik-und-geodaten/monitoring-energiestrategie-2050>
- [3] ClimaBau – Planen angesichts des Klimawandels, Bundesamt für Energie BFE, Hochschule Luzern 2017
- [4] Potentiel d'exploitation des stations d'épuration des eaux usées en tant que source d'énergie thermique, OFEN, 23.11.2022

Stratégie énergétique du Canton de Genève et études sur les Réseaux Thermo Lacustres GLN et GeniLac

- [5] PLAN CLIMAT CANTONAL – Volet 2 du 20 décembre 2017 / page 6, Fig.2 : Bilan carbone et objectifs de réduction
- [6] Réponse du Conseil d'État de Genève sur la Réalisation d'un barrage transfrontalier à Conflan, QUE 523-A, 5 octobre 2016
- [7] Valorisation thermique des eaux profondes lacustres : le réseau GLN et... J. Faessler et. al., UNIG, Arch. Sci. (2012) 65 :215-228
- [8] Viquerat P-A. 2012. Utilisation de réseaux d'eau lacustre profonde pour la climatisation et le chauffage ... Étude de cas : le projet GLN (Genève-Lac-Nations) à Genève, Thèse de doctorat n° 4448, Université de Genève.
- [9] Réseau thermique Genève-Lac-Nations (GLN), Étude de cas D. Crochet et al. SIG, SuisseEnergie, 18.10.2017
- [10] De GLN à Genilac, 10 ans d'apprentissage dans la valorisation thermique des eaux du Léman, Sophie Durandeu, SIG, ARPEA-27.09.19
- [11] Enjeux et développement des réseaux thermiques basse température à Genève, Fabrice Malla, SIG, 14.11.2019 <https://www.cuepe.ch/html/enseigne/pdf/semin-19-20-5.pdf>

Réseaux de chaleur

- [12] Décarboner le système énergétique à l'aide des réseaux de chaleur ; État des lieux et scénarios prospectifs pour le canton de Genève. Thèse de doctorat Loïc QUIQUERAZ, UNIG 2017, no. Sc. 5056
- [13] Potentiel des installations de chauffage et de refroidissement à distance, Rapport du Conseil fédéral, Bern 17.12.2021. Ref. BFE-042.16-127/5
- [14] Charta zur Beschleunigung des Ausbaus Themischer Netze, August 2022 (www.uvek.admin.ch)

Hydroélectricité

- [15] Étude sur le potentiel hydroélectrique de la Suisse 2019, OFEN
<https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/58260.pdf>
- [16] Grande hydraulique, AES, juillet 2020
- [16.1] Complexe Grande Dixence : <https://www.alpiq.ch/fr/production-denergie/centrales-hydroelectriques/centrales-a-accumulation/grande-dixence>

Energie Solaire

- [17] Installations solaires de préchauffage de l'eau chaude sanitaire pour immeubles locatifs de 10 à 200 logements, C. Macherel et G. Ktrebs, Ville de Genève, Les cahiers du Service du chauffage, No. 3, juin 1990
- [17.1] Production d'électricité en hiver grâce au photovoltaïque. Rapport du Conseil fédéral en réponse au postulat 19.4157 Reynard du 25 septembre 2019, Berne, 23 juin 2021
- [17.2] Le plan Solaire et climat, Roger Nordmann, 2019, Edition Favre

Impacts refroidissement des centrales électronucléaires

- [18] Exploitation des centrales nucléaires et environnement, J.-J. CELERI, F. BIDARD, B. BARDIN, EDF/DSRE, EDF, RGN 1987.
- [19] Interaction des centrales nucléaires du bord de la Loire avec le fleuve, P. BOUSSARD, J.-C. ZWALD, EDF/DSRE, RGN 1993.
- [19.1] https://www.sfen.org/wp-content/uploads/2023/06/Combien_deau_consomment_les_centrales_nucleaires_Sfen_2023V2.pdf
- [19.2] [Chronologie de la lutte contre les légionnelles dans la centrale nucléaire de Leibstadt » IFSN \(ensi.ch\)](#)

Potentiel thermique lacustre et Environnement

- [20] Dynamique du système lacustre, Philippe Zahner et Jean-Pierre Vernet
- [21] Température et mouvements des eaux des lacs, Bosset, Eric, Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences naturelles, 1962-1964
- [22] Courantologie lémanique, Lemmin, Ulrich, Archives des Sciences 1998
- [23] Structure thermique et courantologie du Léman, Anh Dao Le Thi et al. Archives des Sciences (2012)65 :65-80
- [24] Seasonality modulates wind-drive mixing pathways in a large lake, Beito Fernandez castro et al. Communications earth & environment (2012)2 :215
- [25] Vagues Kelvin dans le lac Léman, D. Bouffard, U. Lemmin, 2013, Journal de recherche sur les Grands Lacs
- [26] Program « Thermische Netze » Nutzung von Oberflächengewässer für thermische Netze, B. Schaffner, K. Niederberger, EnergieSchweiz, BFE, 09.2017
- [27] Utilisation thermique des eaux superficielles, Potentiel des lacs et rivières suisses A. Gaudard; M. Schmid, Eawag; A. Wüest, Eawag et EPFL, AQUA & GAS N° 6. , 2018
- [27.1] <https://opendata.swiss/fr/dataset/potenzial-der-seen-und-flusse-fur-warmeentzug-und-warmeeinleitung>
- [28] The vulnerability of lakes to climate change along an altitudinal gradient, L. Raman Vinna, I. Medhaug, M. Schmid, D. Bouffard, Communications earth & environment, 2021
- [29] Model-based data analysis of the effect of winter mixing on primary production in a lake under reoligotrophication. S. Krishna et al. Ecological Modelling 440 (2021) 109401
- [30] OFEV (éd.) 2022 : Eaux suisses. État et mesures, Office fédéral de l'environnement, Berne. État de l'environnement No 2207 : 93 p.
- [31] Water column dynamics control nitrite-dependent anaerobic methane oxidation by Candidatus "Methyloirabilis" in stratified lake basins, G. Su et al. ISME 20.02.2023, Springer Nature
- [32] Règlement d'application de l'Accord entre le Conseil fédéral suisse et le Gouvernement de la République française concernant la pêche dans le Lac Léman, RS 0.923.211, fedlex.admin.ch
- [33] Les Aires Marines Protégées, un précieux allié pour la biodiversité, juillet 2020 <https://planktovie.biz/actualites/les-aires-marines-protegees-un-precieux-allie-pour-la-resilience-de-la-biodiversite/>
- [34] Les aires marines protégées le mirage de la préservation des océans <https://reporterre.net/Les-aires-marines-protegees-le-mirage-de-la-preservation-des-oceans>
- [35] Le changement climatique asphyxie les lacs, Manon Meyer-Hilfiger, NATIONAL GEOGRAPHIC, 19.07.2021, <https://www.nationalgeographic.fr/environnement/2021/07/le-changement-climatique-asphyxie-les-lacs>

Stockage saisonnier de chaleur

- [36] The Role and Economics of Different Types of Energy Storage, Margen Consult, 1984, Nyköping, Sweden
- [37] Guide to Seasonal Heat Storage, Jean-Christophe Hadorn, SORANE SA, 1987 OFEN
- [38] The cold store for a pumped thermal energy storage system, T.R.Davenne et al. Journal of Energy Storage 14 (2017) 295-310
- [39] A review and evaluation of thermal insulation materials and methods for thermal energy storage systems, Willy Villasmil, Ludger J. Fischer, Jörg Woslitschek, Renewable and Sustainable Energy Reviews 103 (2019) 71-84
- [40] Technologies de stockage de l'énergie, Aperçu général 2021, Dr. Stefan Oberholzer OFEN 06.12.2021

- [41] *Winterstrombedarf und saisonale Wärmespeicher – mit Sommerwärme Strom im Winter sparen.* Positionspapier des Forums Energiespeicher Schweiz Bern. Prise de position sur le stockage saisonnier de chaleur du Forum suisse pour le stockage d'énergie (FESS), mai 2022, aeesuisse.ch

CORSAIRE

- [42] Un ingénieur veut chauffer Genève avec de l'énergie gaspillée, W. van Sprolant, Tribune de Genève 30.11.1992, article de Pierre Ruetschi.
- [43] Travail de Master EPFL, W. van Sprolant (1995) *Valorisation des rejets thermiques du CERN dans la Correction saisonnière de la température du réseau public d'eau potable du canton de Genève.*
- [44] *Proposal for the CORSAIRE energy projet as part of a sustainable develoment effort*, W. van Sprolant, EPS 10 Trends in Physics, 10th General Conference of the European Pysical Society, September 9-13, 1996, Sevilla (Spain)
- [45] Le Projet CORSAIRE à l'Expo 2001, W. van Sprolant, CvS énergies sàrl, 1997
- [46] **Plan directeur cantonal de l'énergie de Genève**, (dans le cadre de la Conception générale de l'énergie CGE 2001-2005), rubrique Planification énergétique territoriale, Objectifs chiffrés : **Démarrage du projet CORSAIRE.**
- [47] Winter temperature correction of the public drinking water mains by industrial waste heat mass recycling (CORSAIRE process), W. van Sprolant, World Engineers' Convention, 4-9 September 2011, Geneva
- [48] From toxic releases to damages on human health : A method for life cycle impact assessment, with a case study on domestic rainwater use. P. Crettaz, Thèse no. 2212 (2000) EPFL 2021.
- [49] Traitement de potabilisation des eaux de surface désinfection, Eau de Paris, Conf2006/64.
- [50] Référentiel d'analyses du contrôle sanitaire des eaux, ANSES/LHN/REF-CSE - Version 3 Septembre 2020.
- [51] Deep Lake Water Cooling (DLWC) <https://www.enwave.com/case-studies/enwave-and-toronto-water-tap-into-innovative-energy-source/>
- [52] <https://www.washingtonpost.com/climate-solutions/interactive/2021/toronto-deep-lake-water-cooling-raptors/>
- [53] <https://deepresourcse.wordpress.com/2020/12/18/database-european-large-scale-solar-heating-plants/>
- [54] Quelle est la température de l'eau froide du réseau des SIG ? Archive Interroge-Question/réponse Bibliothèques municipales de Genève, 27.08.2015
- [55] Bâtiments résidentiels locatifs à haute performance énergétique : objectifs et réalités. J.-M. Zraggen, Thèse no. 4218 UNIG 2010
- [56] Les températures du sol, G.P Williams ; L.W. Gold, février 1977 Archives des publications du CNRC Canada
- [57] Les aspects liés à la température de l'eau potable Santé Canada, Ottawa (Ontario) 2021

ULISSE divers

- [58] Centrale de Chauffage par Thermopompes, Domaine Ir et Infrastructures EPFL, CCT /J. SCHMID, 21.04.2015
- [59] Plan directeur des énergies 2015-2045, Domaine Ir et Infrastructures EPFL, décembre 2015
- [60] Analyse environnementale préliminaire du projet ULISSE, Jean-François Rubin, hepia-inTNE, 2022
- [61] Analyse préliminaire des risques liés aux courants lacustres menaçant l'intégrité structurale d'ULISSE, Zsolt Vecsernyes, Laboratoire d'hydraulique appliquée LHA de HEPIA 2022
- [62] Robot sous-marin/lacustre suisse de Tethys Robotics
<https://www.tecindustry.ch/fr/actualites/plonger-avec-proteus.html>
- [63] Pompes à Chaleur TRANE RTSF, type eau/eau à compresseur à vis www.tranebelgium.com
- [64] Bâtiments résidentiels locatifs à haute performance énergétique : objectifs et réalités, Jean-Marc Zraggen, Thèse 2010 UNIG.
- [65] Le procédé CORSAIRE ou Comment réduire de 5 à 10 % l'énergie des immeubles d'une Ville (entière) ? William van Sprolant, CvS énergies sàrl, 01.12.2018
- [66] Simulation of an Under Lake Infrastructure for Capture and Storage of Solar Energy (ULISSE) D. Bello-Mendes, R. Rozsnyo (HEPIA), W. van Sprolant CvS Énergies sàrl, COMSOL Conference Munich 2023

Annexes 1 : Expérimentations réelles sur la Maquette ULISSE

1) 29 juillet 2022 : 1^{er} essai d'injection d'eau chaude dans la Maquette

Le Volume de la Maquette est de 77 litres (Vm). Le temps de chargement est de 16 minutes (**débit d'eau : 4,7 lit/min**). Durant le chargement, la température du mitigeur d'alimentation d'eau chaude sanitaire du réseau est de 44 °C (mesuré sur le multimètre CMM DT-21 en sortie de la platine hydrothermique). Sur la figure 1 ci-dessous on observe des bulles d'air entraînées avec les jets d'eau en sortie de la rampe de distribution d'injection et d'extraction située au sommet de la Maquette. Sous l'effet du débit ou de la vitesse d'éjection, les jets ne sont pas perpendiculaires mais en biais, orientés vers le milieu

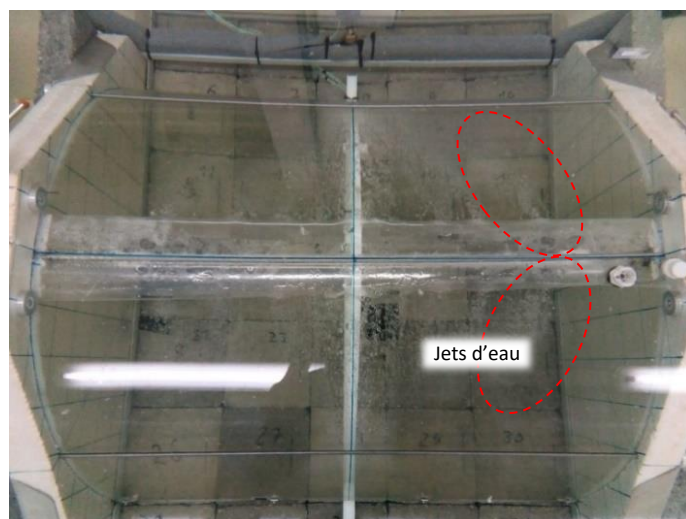
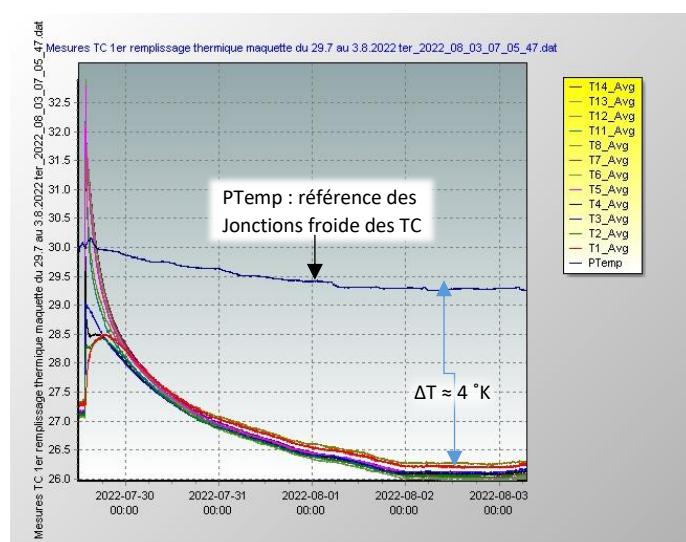


Figure.1 : jets d'eau en sortie de la rampe de distribution de la Maquette lors d'un chargement à 4.7 lit/min

Le graphique 2 ci-dessous montre les mesures de la température par les 14 thermocouples (TC) réparties dans la Maquette. La période d'enregistrement s'étale sur 5 jours, du 29 juillet au 3 août 2022 et couvre le long refroidissement asymptotique jusqu'à l'équilibre thermique avec la cuve à environ 26 °C.

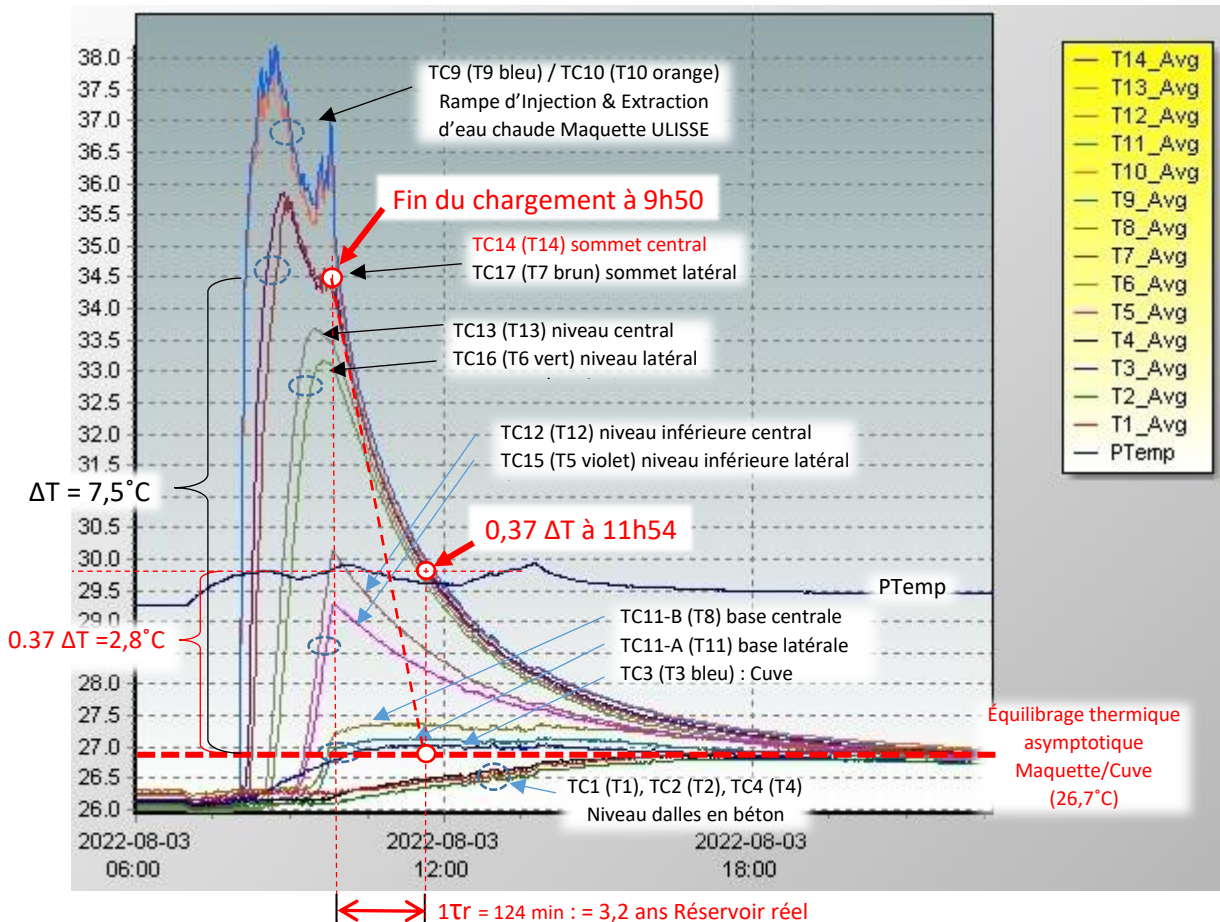


Graphique 2 : visualisation du chargement d'eau chaude suivi de son refroidissement dans la Maquette d'ULISSE

On remarque également l'important écart de 4 °K, entre la température de l'eau dans la cuve (26 °C) et « PTemp » qui est la température de référence des « jonctions froides » des TC dans le Datalogger. Elle est proche de la température du local durant la canicule de l'été 2022.

2) Essai du 03 août 2022 : Chargement thermique « lent » de la Maquette d'ULISSE

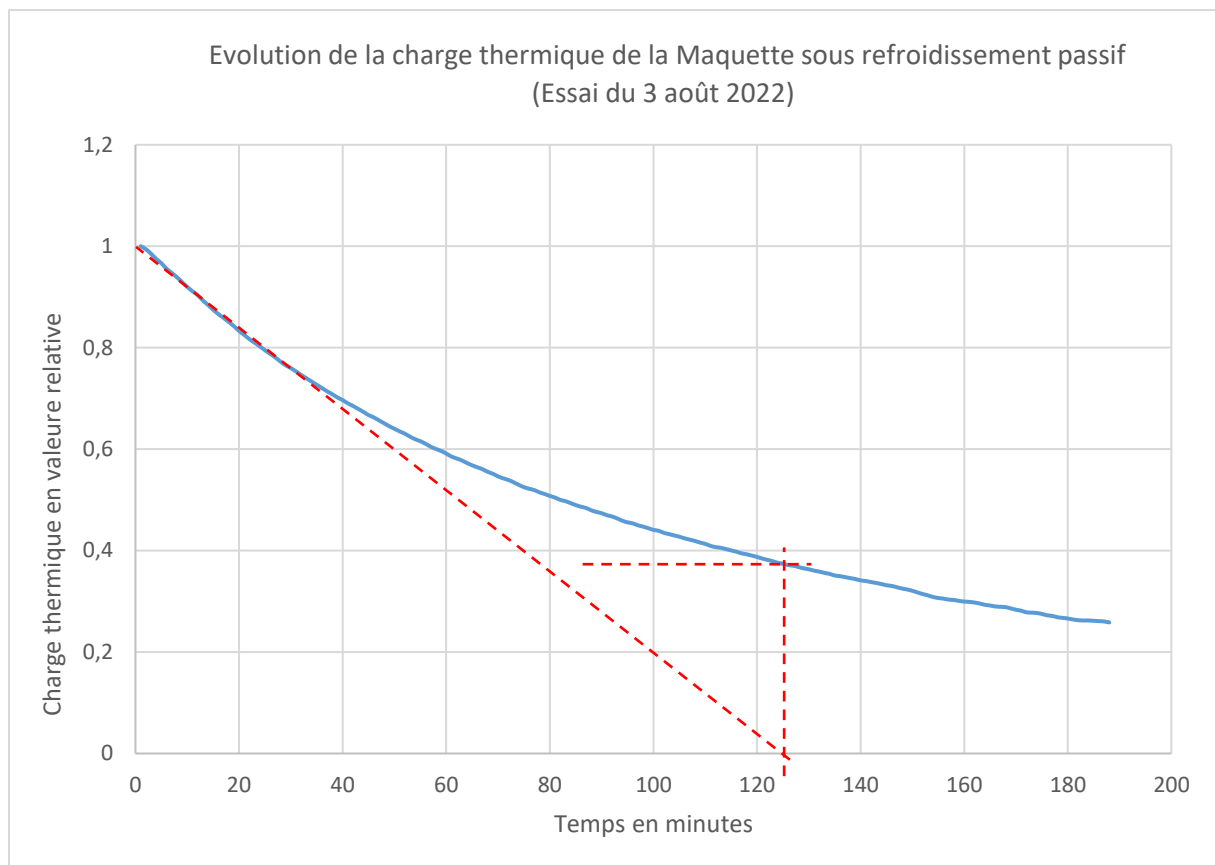
Le temps de chargement est de 97.5 min, avec un débit moyen de 0.79 lit/min (77 lit/97.5 min). Durant le chargement la température en sortie du mitigeur d'alimentation d'eau chaude sanitaire du réseau a fluctué entre 38.5 à 44 °C (multimètre en amont CMM DT-21) et visible sur TC9 & TC10 (38-35.5°C). Ceci s'observe, sur la figure 15.4, aussi dans la partie sommitale de la Maquette (TC14 & TC17) mais pas au niveau central (TC13 & TC16). Pour éviter cette perturbation, on a utilisé par la suite un Réservoir intermédiaire de stabilisation thermique pour l'eau chaude qui est injectée à l'aide de la pompe à membrane de la platine d'alimentation hydraulique (PAH).



Graphique 3 : Chargement (lent) de l'eau chaude dans la Maquette ULISSE suivi du refroidissement asymptotique vers l'équilibre thermique avec la cuve et avec une constante de temps de 124 minutes (T_r).

On remarque, encore sur le graphique 3, le phénomène (recherché) de **stratification thermique**, par les courbes de température clairement séparées temporellement par « paire » de thermocouple TC. Chaque paire de TC est située à un niveau différent dans la Maquette et est répartie horizontalement (TC-central & TC-latéral). Avec le remplissage depuis le haut de la Maquette (TC9/TC10), l'eau chaude se répand graduellement, horizontalement (températures similaires par paire de TC) et verticalement en remplaçant ou en repoussant progressivement vers le bas l'eau froide hors de la Maquette (visualisé par le décalage temporel entre les paires de TC), jusqu'à atteindre le fond de la cuve (dalles en béton).

La dissipation thermique au travers de l'enveloppe de la Maquette d'ULISSE dans la cuve ainsi que dans les dalles en béton au fond, se fait tout naturellement de façon asymptotique vers 26,6°C (température de la cuve d'essais). **La constante de temps du refroidissement (τ_r) est de 124 minutes, correspondant à près de 3,2 ans pour le Réservoir réel type ULISSE d'un volume de 2 millions de m³.**



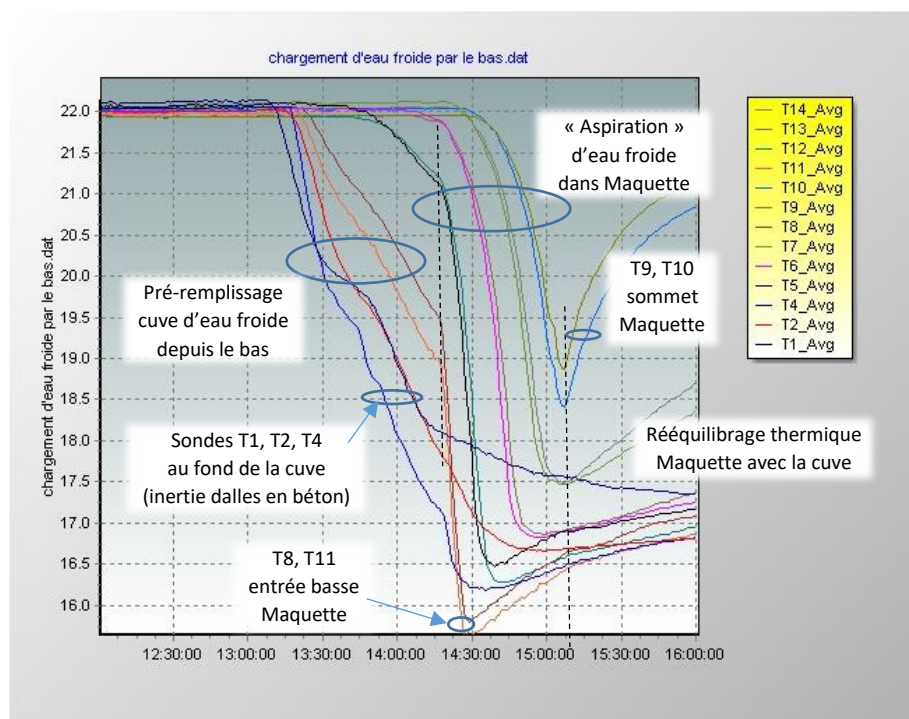
Graphique 4 : Évolution du refroidissement passif au sommet de la Maquette (moyenne T_7 , T_{14}) en valeur relative

3) Essai du 27 septembre 2022 : (début du travail de master de M. Daniel Bello)

Pour permettre à l'étudiant de se familiariser et de modéliser numériquement la Maquette et par la suite le Réservoir réel type ULISSE, on a fait une démonstration du fonctionnement de l'installation expérimentale de la Maquette. À défaut d'eau chaude (l'Eau Chaude Sanitaire du bâtiment étant momentanément en panne), nous avons réalisé un remplissage (chargement) « inversé », avec introduction de l'eau froide depuis le bas de la Maquette par l'aspiration au sommet de l'eau via la rampe d'injection/extraction.

La cuve d'essais, dans laquelle est placée la Maquette, est préalablement remplie d'eau, via la vanne de vidange de la cuve, avec environ 200 litres d'eau froide issue directement du Réseau d'Eau Froide (RDF). Ainsi la Maquette est à sa base sous environ 10 cm d'eau froide, soit 1/3 de sa hauteur. Pour le Réservoir réel (dans le lac), ceci correspond à une couche stratifiée d'eau froide de près de 18 m depuis le fond du lac.

À l'aide de la pompe à membrane, l'eau est « aspirée » par le haut hors de la Maquette. L'eau initialement dans la Maquette est en équilibre thermique avec celle du reste de la cuve d'essais (22°C). L'extraction sommitale de cette eau froide est donc logiquement remplacée progressivement par l'eau froide qui s'introduit depuis la base de la Maquette.



Graphique 5 : Essais de remplissage d'eau froide de la Maquette (essai du 27.09.2022)

On observe clairement sur graphique 5 ci-dessus que l'eau froide reste relativement séparée de la couche supérieure plus chaude (stratification). Étant donné qu'au départ de l'expérience la température dans la Maquette est inférieure à celle de la cuve, le gradient thermique et le flux de chaleur au travers de l'enveloppe sont inversés, allant naturellement de la cuve vers la Maquette qui se réchauffe progressivement. Ce phénomène se produit durant la phase de Stagnation Printanière (SP), juste après la phase de Déchargement Hivernal (en fin du semestre de chauffage des immeubles), lorsque le Réservoir est thermiquement vide ou à son niveau minimal.

4) Essai du 03 octobre 2022

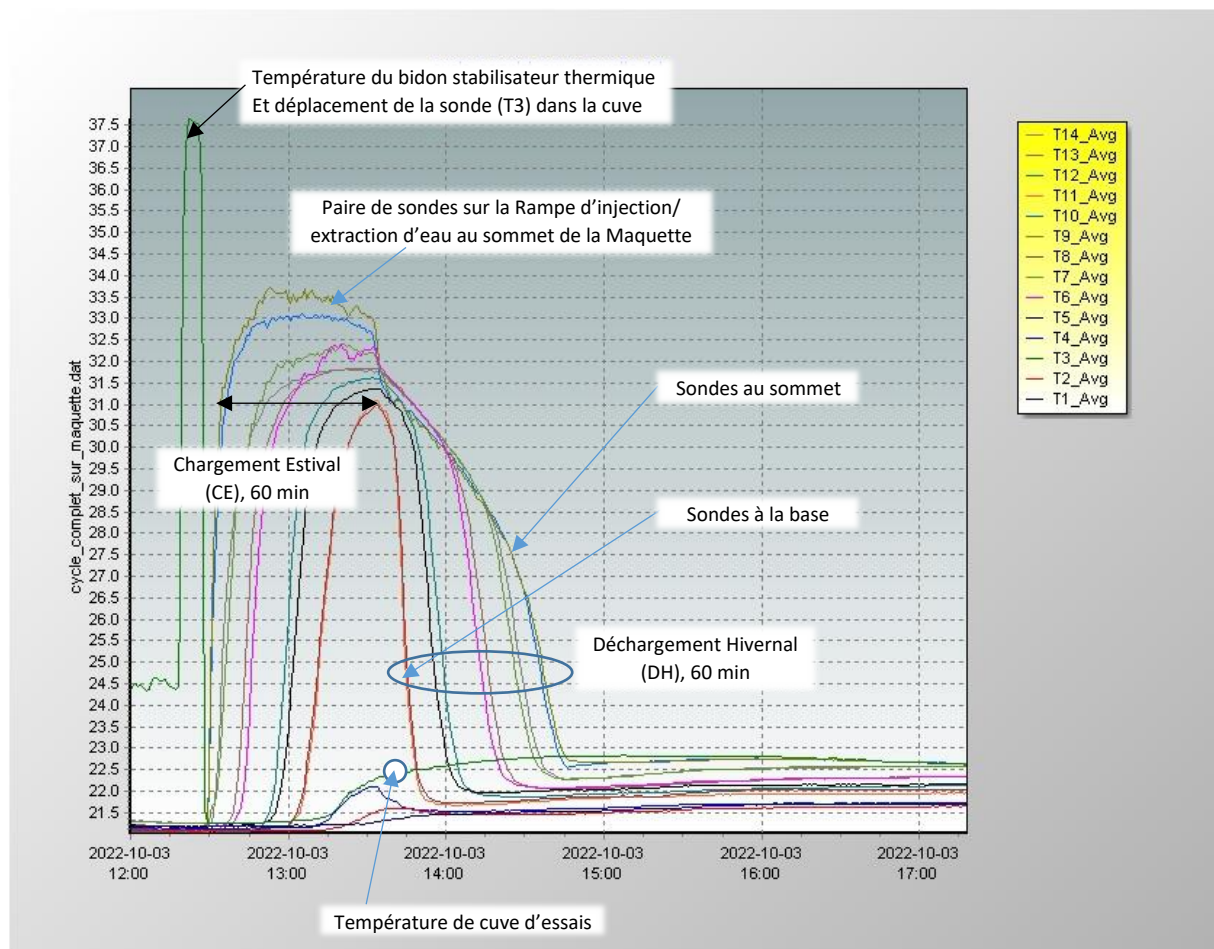
L'eau chaude sanitaire étant rétablie, nous avons pu reproduire sur la Maquette expérimentale un **cycle complet (annuel) de fonctionnement du Réservoir ULISSE**, comprenant : le Chargement Estival (CE), la phase de Stagnation Automnale (SA), le Déchargement Hivernal (DH), suivi de la Stagnation Printanière (SP).

Préalablement au chargement thermique de la Maquette, on a rempli le bidon (isolé) stabilisateur thermique avec 100 litres d'eau à 37°C, qui sont ensuite injectés dans la Maquette (CE) à l'aide de la pompe à membrane. L'extraction d'eau (EH) se fait de manière inversée (Maquette => bidon).



Figure 6 : Bidon de préparation d'eau chaude (isolation périphérique en laine de verre)

Les phases de stagnations (SA, SP) sur la Maquette sont d'une durée de 6 minutes (2 mois dans la réalité), tandis que les phases de chargement et de déchargement se sont déroulées sur une heure (60 min), avec un débit d'eau dans la Maquette (1,4 lit/min, ou 850 Hz sur le compteur de débit). En effet, le Facteur d'Échelle Temporelle (FET) entre le Réservoir réel et celui de la Maquette est de 13'715. Dès lors, la chute de température est « surestimée » (surexprimée) sur la Maquette, vis-à-vis du Réservoir réel, compte tenu que les 60 minutes en Maquette correspondent en réalité à 1 an et 8 mois pour le Réservoir réel dans le lac.



Graphique 7 : Graphique du relevé des mesures de température des thermocouples situés dans la Maquette (essai 03.10.2022)

Lors de cette expérience, on observe au chargement ainsi qu'au déchargement d'eau de la Maquette une **stratification thermique bien marquée** (décalage temporel des températures par paires de thermocouples situés à la même hauteur. Notamment la température, au niveau de l'extraction, d'eau chute bien la dernière.

Par ailleurs, à la fin du temps « réduit » de déchargement de la Maquette, les sondes T9 et T10 sur la rampe d'extraction au sommet, indiquent une température encore supérieure à celle de la cuve. Cela signifie que la Maquette contient encore une certaine charge thermique vis-à-vis de la température de la cuve (lac). Ceci du fait, que la *Thermocline à front plat* a tendance à se redresser et dilue partiellement l'eau chaude supérieure avec celle froide inférieure. Il en résulte que **pour extraire toute l'énergie-chaleur de la Maquette il faudrait pomper plus d'eau que le volume initial de la Maquette et ceci vaut évidemment aussi pour le Réservoir réel d'ULISSE dans le lac !**

On observe également que la température au niveau des thermocouples TC14 au sommet-central et -latéral TC17 est inférieure d'environ 1°C à celle de l'injection d'eau chaude (TC9 et TC10) dans la Maquette. La raison en est que durant le chargement d'eau chaude, la déperdition thermique a lieu simultanément.

5) Essai du 03 novembre 2022 (chargement avec manteau isolant)

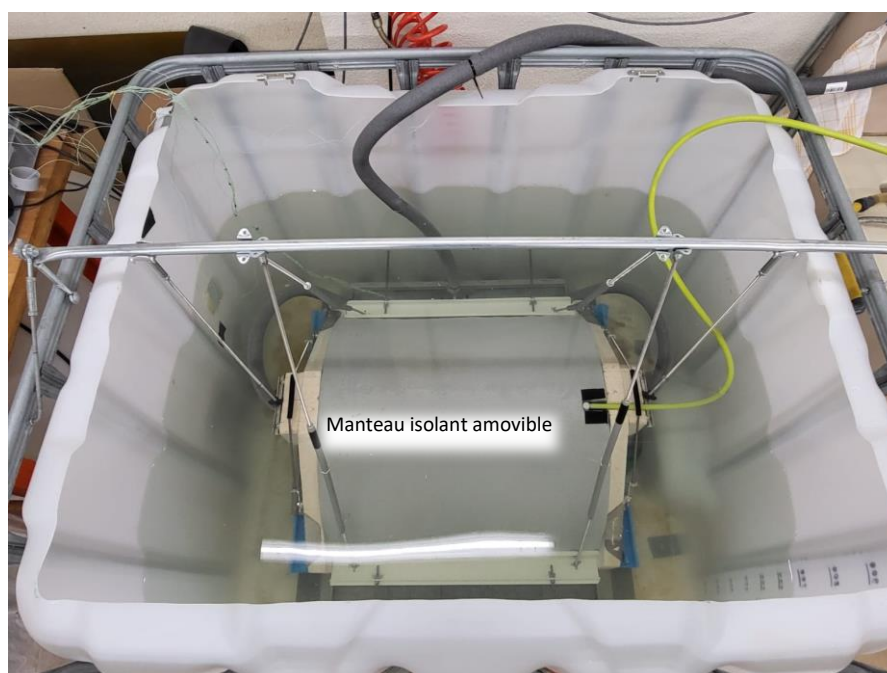
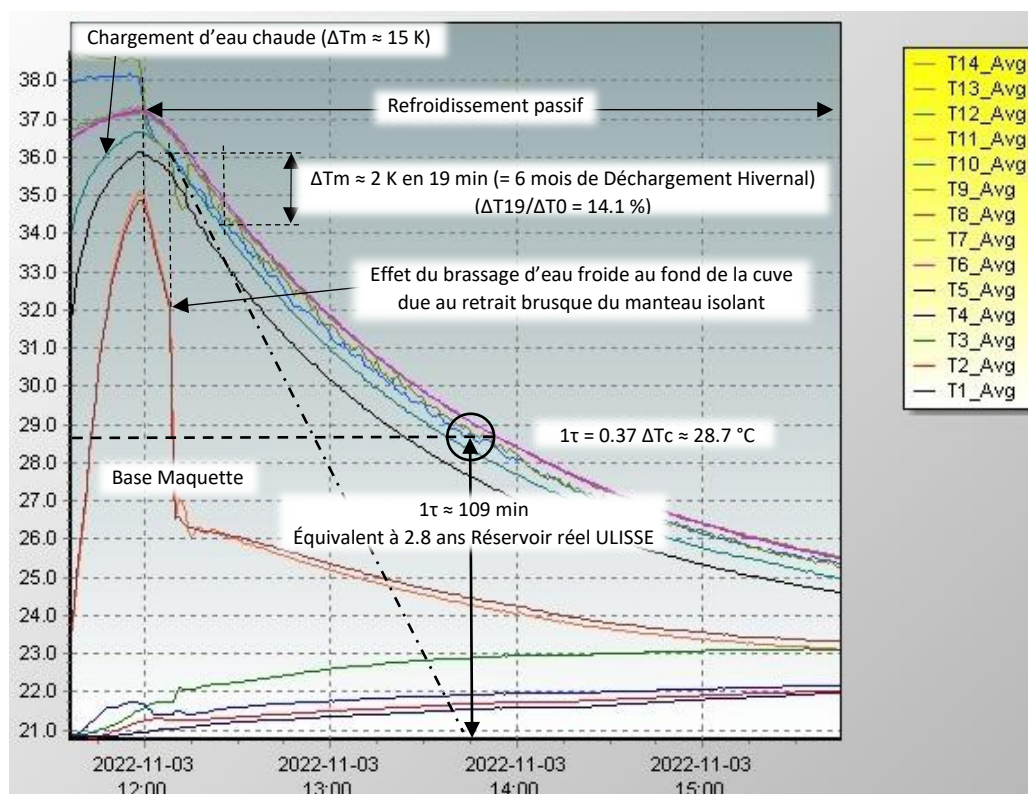
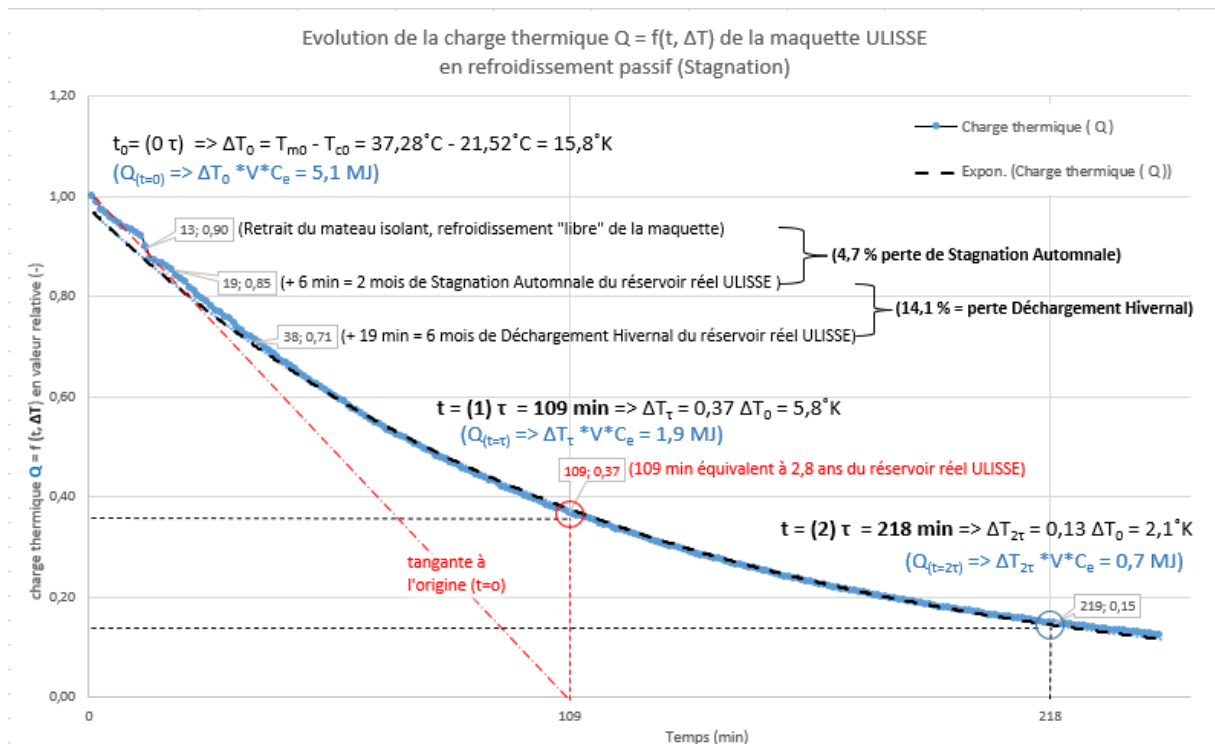


Figure 8 : Maquette ULISSE avec manteau isolant amovible lors du chargement thermique (essai 03.11.2022)



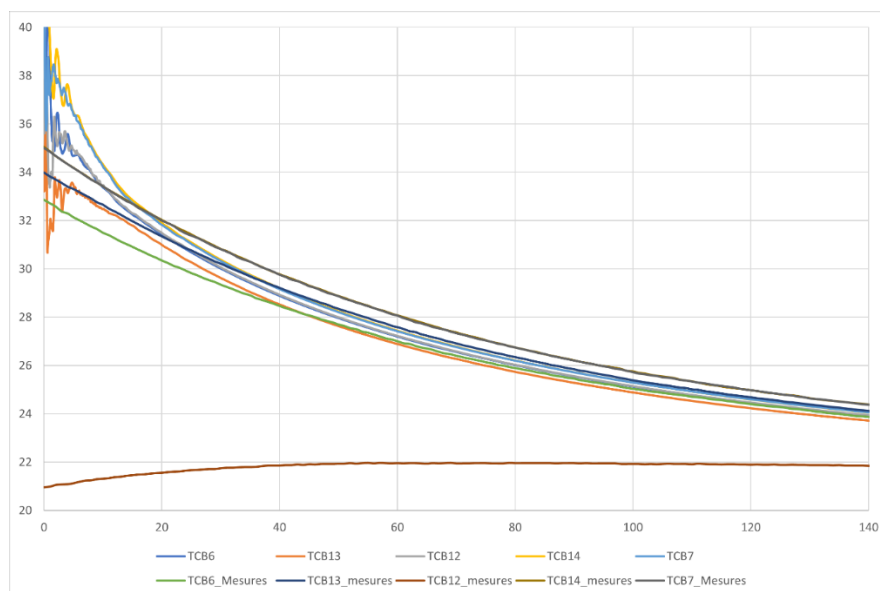
Graphique 9 : Evolution des températures dans la Maquette après chargement thermique (avec manteau isolant) et refroidissement passif sans manteau (essai du 03.11.2022)



Graphique 10 : Evolution de la charge thermique (Q) ou du contenu d'énergie-chaleur de la Maquette durant son refroidissement passif, suivant une exponentielle décroissante avec une constante de temps $\tau = 109 \text{ min}$

$$1\tau = 0.37 \Delta T_m(t_0) = 0.37 * (T_m(t_0) - T_c) = 0.37 * (37.28^\circ\text{C} - 21.52^\circ\text{C}) = 5.8^\circ\text{K} ; T_m @ t=1\tau = 28.7^\circ\text{C}$$

Comparaison des résultats des mesures du refroidissement lors de la stagnation de la Maquette après un demi chargement thermique, avec ceux de la simulation numérique (COMSOL).



Graphique 11 : Comparaison des résultats des mesures du refroidissement lors de la stagnation de la Maquette après un demi chargement thermique, avec ceux de la simulation numérique (COMSOL).

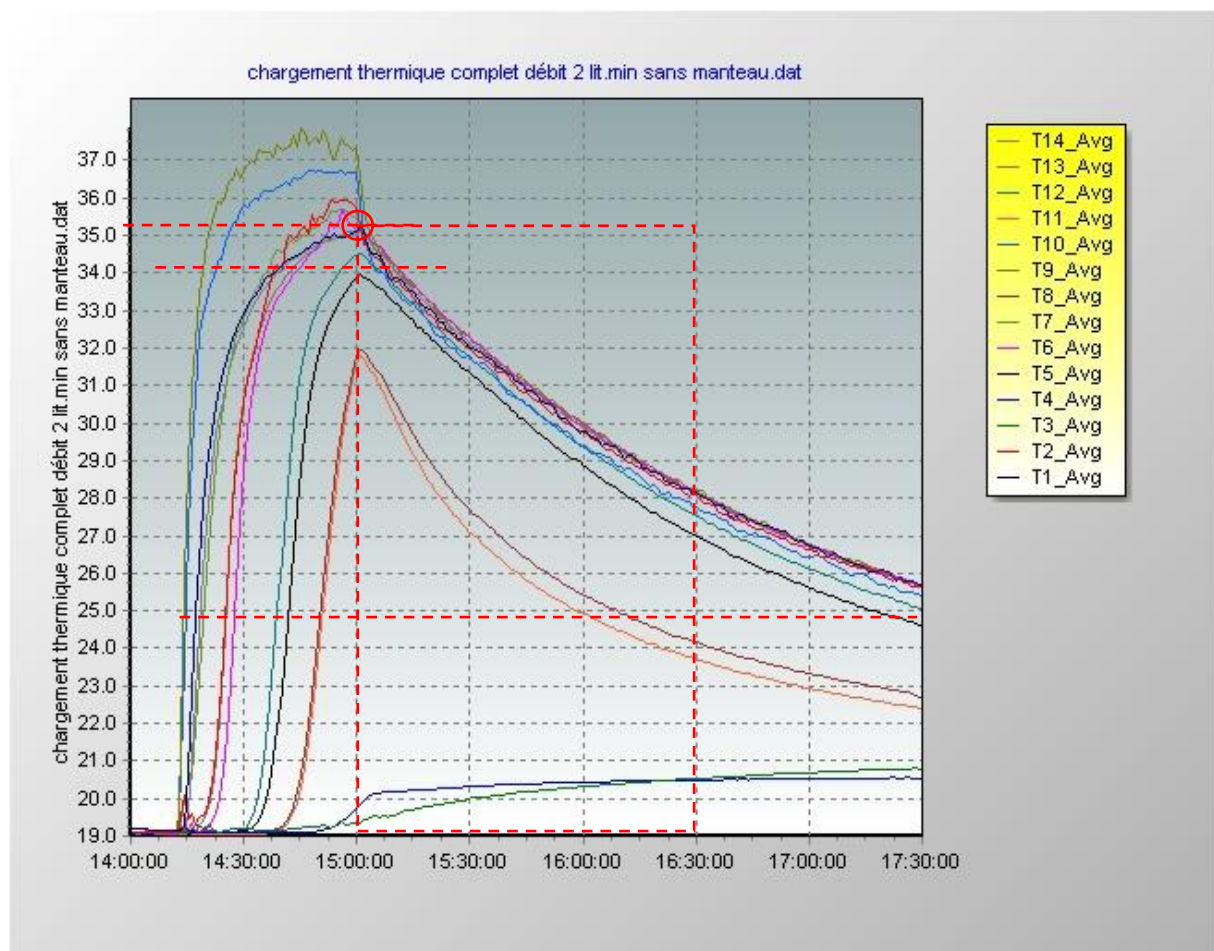


Figure 12 : Chargement complet et refroidissement Maquette sans manteau isolant du 22 novembre 2022

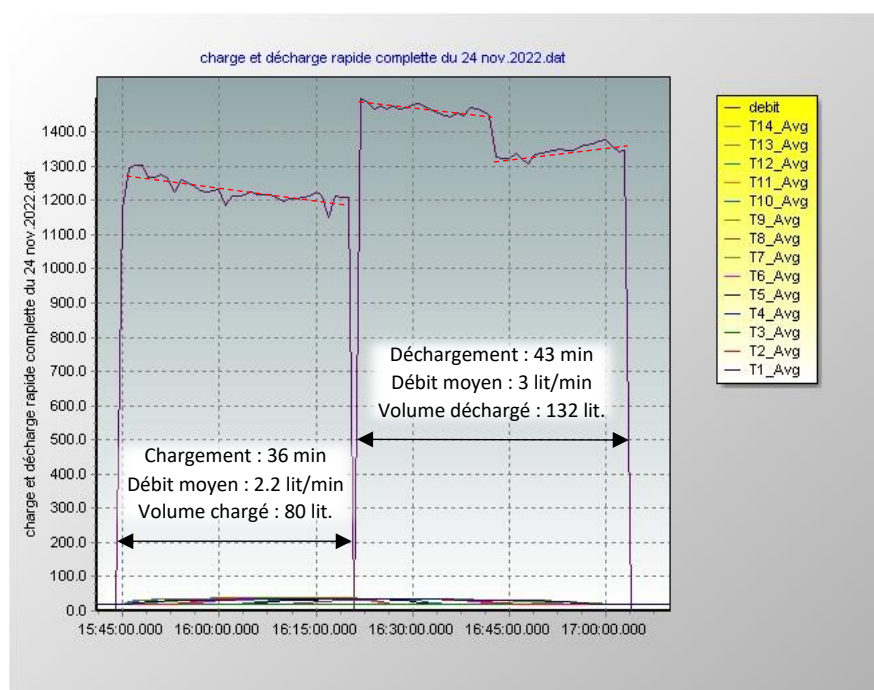
Modifications préalables des sondes thermocouples :

Placement du thermocouple TC8 au sommet du support des sondes et connexion sur le canal T1 du Datalogger. Placement du thermocouple TC5 sur le support des sondes (à côté du TC16 pour contrôle de ce dernier) et connexion sur le canal T2 du Datalogger.

6) Essai du 24 novembre 2022 : Charge et décharge thermique complète Maquette

La Maquette (d'un volume d'environ 77 litres) est (sur)chargée en 36 minutes avec 80 litres (104 %) d'eau à une température d'environ 38 °C soit avec un débit moyen de 2.2 lit/min. L'eau chaude injectée excédentaire (3 lit.) à la capacité de la Maquette « déborde » automatiquement dans la cuve d'essais.

Après une minute (commutation hydraulique de la pompe), la Maquette est déchargée de son eau chaude avec un débit légèrement augmenté à environ 2.3 lit/min (instabilité ?) et prolongé durant 43 minutes soit 84 litres. Le déchargement a été prolongé au-delà du volume de la Maquette (109 %) et ce jusqu'à ce que la température de l'eau extraite atteigne celle de la cuve ($\approx 19^\circ\text{C}$) de manière à y avoir extrait toute l'énergie-chaleur (en équilibre thermique avec la cuve d'essais).



Graphique 13 : Profil du débit (Hz) de charge et de décharge thermique de la Maquette (essai 24.11.2022)

On observe que la température dans la Maquette évolue progressivement avec le temps et de façon quasi parallèle à tous les niveaux. Ceci indique qu'il se crée une stratification thermique verticale et durable dans la Maquette ; c.-à-d. qu'il n'y a pratiquement pas de mélange thermique entre l'eau chaude injectée par le haut et celle plus froide repoussée vers le bas hors de la Maquette et ceci aussi inversement durant tout le processus de déchargement.

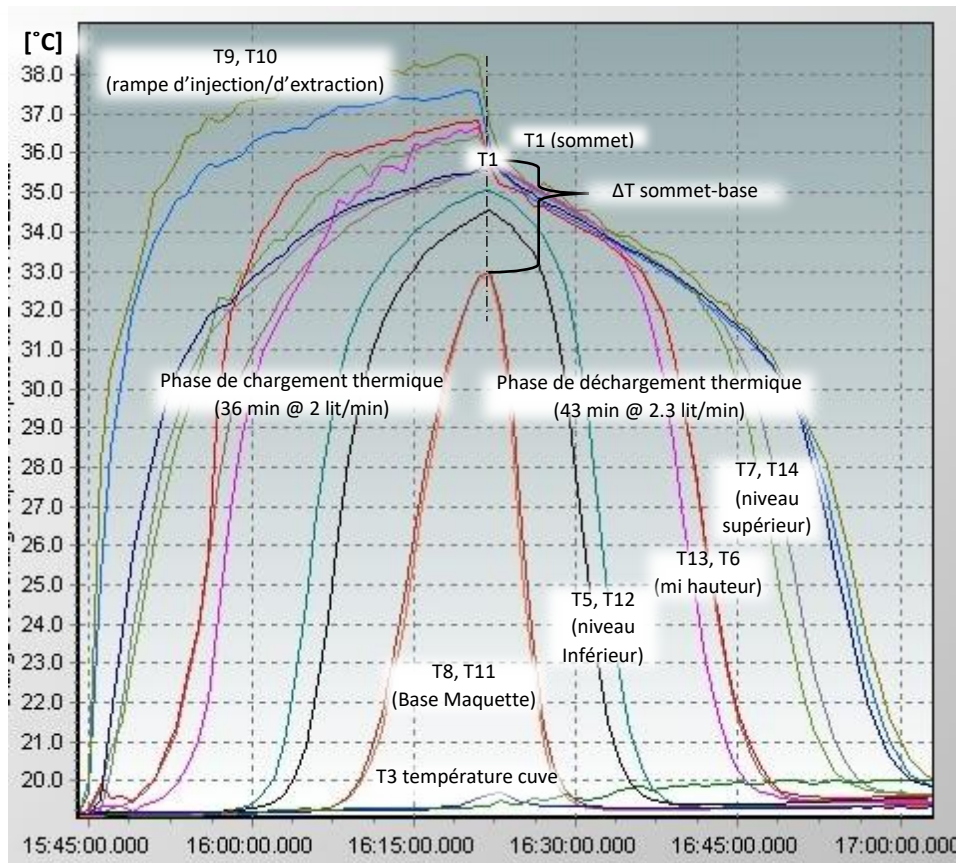
La température des thermocouples TC9 et TC10 affiche une courbure qui ne correspond pas exactement à la température de l'eau injectée dans la Maquette (constante à près de 38°C). Celle-ci est due au fait que les thermocouples en question sont fixés sur la paroi extérieure de la rampe d'injection et d'extraction d'eau. Cette dernière est en laiton et baigne dans l'eau à l'intérieur et au sommet de la Maquette, ce qui fait que les sondes thermiques T9 et T10 sont influencées (proches de) par la température environnante. Cela induirait une erreur dans le calcul (sous-estimation) de l'introduction de l'énergie-chaleur dans la Maquette en se basant sur l'enregistrement continu de T9 et T10 et par conséquent une sous-estimation de la perte thermique durant le chargement !

Durant les 36 minutes du chargement, la Maquette perd au travers de son enveloppe de la chaleur vers la cuve (Q_p). Ceci se remarque sur la figure par le fait qu'en fin de charge, à tous les niveaux de la Maquette, la température est inférieure à celle d'introduction (T9 et T10).

Compte tenu de la forme transversale hyperbolique de l'enveloppe, le volume d'eau concerné augmente à mesure que l'on descend dans le Réservoir. C'est-à-dire que les sondes thermiques inférieures sont associées à un volume d'eau progressivement plus grand. La température moyenne du stock d'eau chaude dans la Maquette correspond donc a priori à celle entre T12 et T13 (à demi volume), soit à environ 35°C. Celle-ci représente une perte (ΔT_{pc}) de 3°K sur un chargement initial de 19°K soit près de 16 %.

Durant les 43 minutes de la phase de déchargement, la température « d'extraction » (T9 & T10) varie également continuellement du fait du cumul des pertes thermiques durant tout le processus de chargement et celle de déchargement. Par contre, la température affichée par T9 et T10 correspond bien à celle de l'eau aspirée hors de la Maquette par la pompe.

On peut remarquer que, compte tenu du facteur d'échelle (13'715) entre le Réservoir réel ULISSE dans le lac et la Maquette, les temps de chargement (36 min) et de déchargement (43 min) dans la Maquette sont proportionnellement disproportionnés (respectivement 600 et 230 %). Toutes autres choses étant égales par ailleurs, les pertes thermiques en sont donc a priori également surestimées.



Graphique 14 : Profil des températures à différents niveaux dans la Maquette ULISSE lors d'un cycle de chargement et de déchargement thermique (essai 24.11.2022)

Pour respecter ce facteur d'échelle temporelle (FET), le temps de chargement de la Maquette devrait être réduit à 6 minutes pour les 77 litres de son volume et le débit correspondant devrait augmenter à 13 lit/min. La perte thermique associée devrait aussi être réduite d'un facteur 6 et donc être limitée à près de 3 %.

Toutefois, l'enjeu énergétique (économie d'électricité) est moins crucial en phase de Chargement Estival que pour celle du Déchargement Hivernal ou le semestre de chauffage des immeubles.

De la même manière, pour respecter le facteur d'échelle temporelle, le temps et le débit de déchargement de la Maquette devraient être portés respectivement à 18.5 min et 4.3 lit/min (limité aux 77 litres du volume de la Maquette) ou pour une vidange thermique complète de 98 litres, soit un débit de 5.3 lit/min. Là aussi, les pertes thermiques correspondantes devraient être réduites dans la même proportion.

L'énergie utile extraite de la Maquette (Q-ext) peut être déterminée en intégrant durant la période de déchargement le produit du débit (D) avec la différence de température entre l'eau extraite de la Maquette avec celle de la cuve d'essais (ΔT_{m-c}) et la chaleur volumique de l'eau (c_e):

$$Q_{\text{-ext}} = \int dD * \Delta T_{m-c} * c_e = \quad 3.43 \quad [\text{MJ}] \quad 0.95 \quad [\text{kWh}] \quad (...)$$

Avec l'enregistrement via le Datalogger du débit et des températures de T9, T10 (extraction), T3 (température de la cuve), le calcul avec Excel donne la valeur de Q-ext égale à 3.43 MJ ou 0.95 kWh.

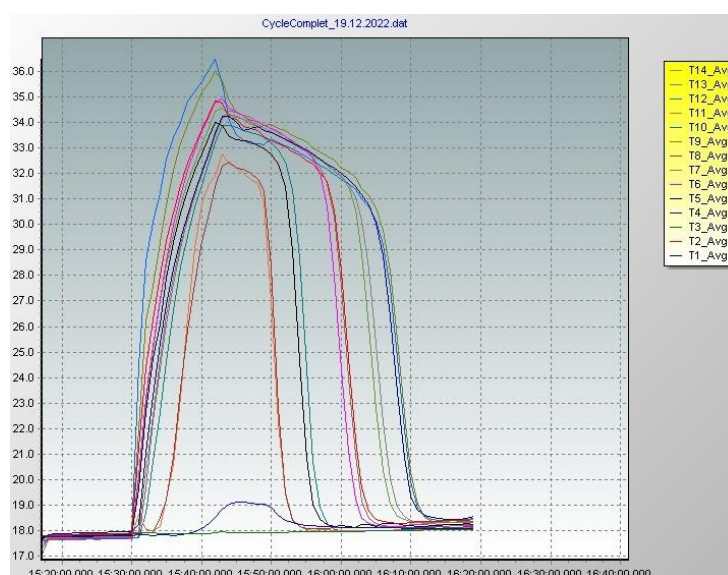
Le rapport entre l'énergie-chaleur extraite (Q-ext) et celle introduite (Q-int) donne une première estimation de l'efficacité « brute » du stockage de la Maquette :

$$\text{Eff-stock Maquette} = Q_{\text{-ext}} / Q_{\text{-int}} = 3.43 \text{ MJ} / 5.78 \text{ MJ} = 0.59 \quad 59 \quad [\%]$$

Compte tenu de la durée du cycle de chargement et de déchargement (36 + 43 = 79 min), la perte d'énergie-chaleur ($Q_{\text{-P}} = Q_{\text{-int}} - Q_{\text{-ext}} = 2.35 \text{ MJ}$) représente 41 % de Q-int. Elle est logiquement proportionnelle à la durée du cycle en question. Dès lors, en réduisant le temps du cycle à 24.5 min (6 + 18.5 min) par rapport aux 79 min, de manière à respecter le facteur d'échelle temporelle, la perte thermique ($Q_{\text{-pr}}$) devrait être réduite à 0.73 MJ soit à 13% de Q-int :

$$Q_{\text{-pr}} = Q_{\text{-p}} * (24.5 \text{ min} / 79 \text{ min}) = \quad 0.73 \text{ [MJ]} \Rightarrow 13 \% \text{ de } Q_{\text{-int}}$$

7) Essai du 19 décembre 2022 : Charge et décharge thermique complète Maquette



Graphique 15 : Profil des températures à différents niveaux dans la Maquette ULISSE lors d'un cycle complet de chargement, stagnation et de déchargement thermique (essai 19.12.2022)

Phase de Chargement Estival (SE)

La Maquette (d'un volume d'environ 77 litres) est chargée en 14 minutes avec 91 litres (118 %) d'eau à une température d'environ 36 °C soit un débit moyen de 6 lit/min. Sur la base de la température réelle d'injection ($\approx 36^\circ\text{C}$) et celle de la cuve ($\approx 18^\circ\text{C}$), soit un $\Delta T = 18,3 \text{ K}$, l'énergie-chaleur injectée Brute (CTB) est de près de 7 MJ (1.94 kWh). Compte tenu de la dissipation de chaleur durant la phase de chargement thermique, l'accroissement de la température moyenne dans la Maquette par rapport à la température de la cuve (TC3) est de 16.06 K et la Charge Thermique Nette (CTN) d'environ 5.18 MJ (1.44 kWh), ce qui correspond à une Perte Thermique de Chargement (PTC) de 1.8 MJ (0.5 kWh) ou 26 % de la CTB.

19/12/2022											
Temps (min)	débit (Lit/min)	Cum volume (lit)	ΔT_9 (°K)	ΔT_{10} (°K)	$\Delta T_{\text{moy-9-10}}$ (°K)	Q (KJ)	Q max (KJ)	P max (KW)	Cumul QBC (KJ)	QBC (%)	Volume Maquette (%)
1	5,05	5,05	-0,13	-0,08	-0,10	-2,22	386,89	6,45	386,89	5,5%	6,6%
2	3,21	8,26	-0,11	-0,06	-0,09	-1,14	246,17	4,10	633,06	9,1%	10,7%
3	6,65	14,91	-0,12	-0,06	-0,09	-2,51	509,97	8,50	1 143,03	16,4%	19,4%
4	6,28	21,19	4,08	6,58	5,33	140,19	481,85	8,03	1 624,88	23,3%	27,5%
5	6,38	27,56	8,31	10,65	9,48	252,98	488,88	8,15	2 113,76	30,3%	35,8%
6	6,28	33,85	9,67	12,16	10,92	287,01	481,73	8,03	2 595,49	37,2%	44,0%
7	6,35	40,20	11,41	13,34	12,38	329,03	487,09	8,12	3 082,58	44,2%	52,2%
8	6,36	46,55	12,84	14,68	13,76	366,04	487,35	8,12	3 569,93	51,1%	60,5%
9	6,36	52,91	14,22	15,49	14,86	395,59	487,86	8,13	4 057,79	58,1%	68,7%
10	6,40	59,31	15,26	16,12	15,69	420,12	490,54	8,18	4 548,34	65,1%	77,0%
11	6,38	65,69	16,01	16,95	16,48	440,36	489,52	8,16	5 037,86	72,2%	85,3%
12	6,32	72,01	16,61	17,31	16,96	448,57	484,54	8,08	5 522,40	79,1%	93,5%
13	6,36	78,37	17,29	17,68	17,49	465,26	487,48	8,12	6 009,87	86,1%	101,8%
14	6,33	84,69	17,64	18,18	17,91	474,19	485,05	8,08	6 494,92	93,0%	110,0%
15	6,35	91,05	18,08	18,56	18,32	487,09	487,09	8,12	6 982,02	100,0%	118,2%
15	6,07	91,05	Chargement Thermique Brute (CTB) :				6 982,02 (KJ)	1,94 (kWh)	100% (CTB)		
Temps (min)	Débit moy. (lit./min)	Total (Lit)	Chargement Thermique Nette (CTN) :				5 177,83 (KJ)	1,44 (kWh)	74% (CTN/CTB)		
			Perte Thermique Chargement (PTC) :				1 804,18 (KJ)	0,50 (kWh)	26% (PTC/CTB)		

Tableau 16 : Phase de chargement thermique de la Maquette (essai 19.12.2022)

Phase de Stagnation Automnale (SA)

La phase de Stagnation Automnale (SA) de la Maquette est de 6 min (2 mois de Réservoir réel ULISSE). La température en début (33.97°C) et fin de stagnation (30.68°C) est la moyenne des 13 thermocouples situés dans la Maquette. Il en résulte une Chute de Température moyenne de Stagnation (CTS : $\Delta T_s = 0.83^\circ\text{C}$), ce qui correspond à une Perte Thermique de Stagnation (PTS) de 266.18 KJ ou 0.07 kWh soit 3.8% de la Charge Thermique Nette (CTN en fin de chargement estival) ; ceci sur la base des 77 litres de volume de la Maquette (Vm) et de la chaleur spécifique volumique de l'eau ($c_{ev} = 4.186 \text{ KJ/lit.K}$) :

$$PTS = \Delta T_s * \Delta T_{sm} * c_{ev} = 266.18 \text{ [KJ]} \text{ ou } 0.07 \text{ [kWh]} \quad (...)$$

Phase de stagnation automnale															
19/12/2022	TC8	TC5//TC16	TC3	TC4	TC15	TC16	TC17	TC11-B	TC9	TC10	TC11-A	TC12	TC13	TC14	débit
	Sommet	Contr. TC16	Eau Cuve	Fond béton	vérierie latérale	latéralieu centraommet	latér:base central	Injection / Extraction			base latéral	latérieur centumilleu	latéralommet centr		(Hz)
15:43:00	34,22	34,74	17,95	18,86	33,88	34,91	34,54	32,3	35,65	35,53	32,75	33,86	34,16	34,15	0
15:44:00	34,22	34,21	17,93	19,03	33,45	34,55	34,28	32,45	34,82	34,02	32,36	33,87	34,45	34,32	0
15:45:00	34,01	34,1	17,91	19,12	33,33	34,38	34,18	32,19	34,38	33,53	32,25	33,79	34,39	34,25	0
15:46:00	33,69	33,84	17,91	19,12	33,28	34,23	34,1	32,18	34,25	33,28	32	33,67	34,26	34,13	0
15:47:00	33,75	33,76	17,91	19,1	33,22	34,09	33,93	31,99	34,04	33,18	31,76	33,6	34,18	34,01	0
15:48:00	33,82	33,67	17,92	19,06	33,1	34,03	33,82	31,76	33,81	33,15	31,61	33,5	34,01	33,9	0
	-0,14	1,43	-0,01	-0,52	1,02	0,93	0,79	0,16	2,12	3,36	1,01	-0,2	-0,29	-0,28	
	ATC8 (°K)	ATC5 (°K)	ATC3 (°K)	ATC4 (°K)	ATC15 (°K)	ATC16 (°K)	ATC17 (°K)	ATC11-B (°K)	ATC9 (°K)	ATC10 (°K)	ATC11-A (°K)	ATC12 (°K)	ATC13 (°K)	ATC14 (°K)	
Température moyenne Début Stagnation (TDS) :							33,97	(°C)	<= Température moyenne Fin Chargement (TFC)						
Température moyenne Fin Stagnation (TFS) :							33,35	(°C)	Durée Phase Stagnation (DPS) : 6 minutes						
Chute Température moyenne Stagnation (CTS) :							0,83	(°C)	2,4% (CTS/ATC)						
Perte Thermique moyenne Stagnation (PTS) :							266,18	(KJ)	0,07	(kWh)	3,8% (PTS/CTN)				

Tableau 17 : Phase de stagnation, évolution de la température dans la Maquette (13 thermocouples) (essai 19.12.2022)

Phase de Déchargement Hivernal (DH)

La Maquette est déchargée « thermiquement » de son eau chaude avec un débit relativement stable de 3.9 lit/min durant 19 minutes (100 % des 77 litres du volume de la Maquette) et ce prolongée jusqu'à 27 minutes soit 109.5 litres. Le déchargement a été prolongé au-delà du volume de la Maquette (142 %) et ce jusqu'à ce que la température de l'eau extraite atteigne celle de la cuve ($\approx 18^\circ\text{C}$) pour en extraire toute l'énergie-chaleur (en équilibre thermique avec la cuve).

L'énergie utile extraite de la Maquette (Q-ext) ou l'énergie-chaleur du Déchargement Thermique Nette (DTN) peut être déterminée en intégrant durant la période de déchargement le produit du débit (D) avec la différence (ΔT_{m-c}) de température entre l'eau extraite de la Maquette (Tm) avec celle de la Cuve (Tc) :

$$DTN \quad Q\text{-ext} = \int dD * \Delta T_{m-c} * c = 4.47 \text{ [MJ]} \quad 1.24 \text{ [kWh]} \quad (...)$$

Avec l'enregistrement via le Datalogger du débit et des températures de T9, T10 (extraction), T3 (température de la Cuve), le calcul (somme) avec Excel donne la valeur de Q-ext (DTN) égale à 0.95 MJ ou 0.95 kWh.

La Charge Thermique Initiale de Déchargement (CID) est compte tenu du volume (Vm) de la Maquette de 77 litres, et la capacité thermique réelle (Q-cap) n'est que de 5.9 MJ. Le reste étant expulsé hors de la Maquette.

$$CID = V_m * \Delta T_{m-c} * C = 77 \text{ lit.} * 18.3^\circ\text{C} * 4.186 \text{ MJ/lit.} = 4.97 \text{ MJ}$$

Le rapport entre l'énergie-chaleur extraite de la Maquette (Q-ext, DTN) et celle Initialement au déchargement (CID) après la perte thermique de la stagnation (PTS) donne l'Efficacité du Déchargement (ED):

$$ED = DTN/CID = 4.47 \text{ MJ} / 4.97 \text{ MJ} = 90 \text{ [%]} \quad (...)$$

La perte thermique durant la phase de Déchargement (PTD) est de 0.49 MJ (0.14 kWh).

L'efficacité réelle du stockage de la Maquette est alors de :

$$\text{Eff-stock Maquette} = Q\text{-ext} / Q\text{-cap} = 4.63 \text{ MJ} / 5.9 \text{ MJ} = 0.78 \text{ [%]}$$

19/12/2022		Cumul						Cumul		Volume
Temps	débit	Volume	ΔT_9 (°K)	ΔT_{10} (°K)	$\Delta T_{moy-9-10}$	QND	PND	QND	QND	Maquette
(min)	(Lit/min)	(lit)	(°K)	(°K)	(°K)	(KJ)	(KW)	(KJ)	(%)	(%)
1	3,89	3,89	15,95	15,19	15,57	253,53	4,23	253,53	5,7%	0,1%
2	3,95	7,84	16,00	15,44	15,72	259,93	4,33	513,46	11,5%	10,2%
3	3,94	11,78	15,83	15,27	15,55	256,57	4,28	770,03	17,2%	15,3%
4	3,91	15,69	15,72	15,13	15,43	252,36	4,21	1 022,39	22,9%	20,4%
5	3,98	19,67	15,53	15,02	15,28	254,38	4,24	1 276,77	28,5%	25,5%
6	3,78	23,44	15,41	14,85	15,13	239,09	3,98	1 515,86	33,9%	30,4%
7	3,89	27,33	15,27	14,68	14,98	243,74	4,06	1 759,60	39,3%	35,5%
8	3,91	31,24	15,04	14,51	14,78	241,93	4,03	2 001,53	44,7%	40,6%
9	3,90	35,15	14,87	14,36	14,62	238,70	3,98	2 240,22	50,1%	45,6%
10	3,90	39,04	14,70	14,19	14,45	235,72	3,93	2 475,94	55,3%	50,7%
11	3,88	42,92	14,57	13,98	14,28	231,55	3,86	2 707,49	60,5%	55,7%
12	3,91	46,83	14,26	13,80	14,03	229,83	3,83	2 937,32	65,7%	60,8%
13	3,86	50,70	14,11	13,64	13,88	224,39	3,74	3 161,71	70,7%	65,8%
14	3,92	54,62	13,87	13,39	13,63	223,85	3,73	3 385,56	75,7%	70,9%
15	3,83	58,45	13,43	13,05	13,24	212,27	3,54	3 597,82	80,4%	75,9%
16	3,84	62,29	13,12	12,68	12,90	207,54	3,46	3 805,36	85,1%	80,9%
17	3,87	66,16	12,65	12,16	12,41	200,79	3,35	4 006,15	89,6%	85,9%
18	3,91	70,06	11,77	11,22	11,50	187,90	3,13	4 194,05	93,8%	91,0%
19	3,92	73,98	10,16	9,48	9,82	161,00	2,68	4 355,05	97,4%	96,1%
20	3,96	77,94	7,51	6,78	7,15	118,39	1,97	4 473,44	100,0%	101,2%
21	3,93	81,87	4,59	3,97	4,28	70,41	1,17	4 543,85	101,6%	106,3%
22	3,98	85,85	2,31	1,94	2,13	35,42	0,59	4 579,27	102,4%	111,5%
23	3,94	89,79	1,01	0,88	0,95	15,59	0,26	4 594,86	102,7%	116,6%
24	3,94	93,73	0,48	0,52	0,50	8,25	0,14	4 603,11	102,9%	121,7%
25	3,90	97,63	0,33	0,42	0,37	6,12	0,10	4 609,23	103,0%	126,8%
26	3,94	101,57	0,29	0,38	0,34	5,53	0,09	4 614,75	103,2%	131,9%
27	3,95	105,52	0,29	0,39	0,34	5,61	0,09	4 620,37	103,3%	137,0%
28	3,99	109,50	0,29	0,37	0,33	5,51	0,09	4 625,87	103,4%	142,2%
3,91		Total (Lit)	Temps \approx 100 % volume maquette: 19 minutes							
Débit moy,		(lit,/min)	Temps \approx 142 % volume maquette : 27 minutes							
Charge thermique Initiale de Déchargement (CID) :		4 972,89	(kJ)	1,38	(kWh)	100,0%	(CID)			
Déchargement Thermique Nette (DTN) :		4 473,44	(kJ)	1,24	(kWh)	90,0%	(DTN/CID)			
Perte Thermique Déchargement (PTD) :		499,45	(KJ)	0,14	(kWh)	10,0%	(PTD/CID)			
Perte Exploitation Nette (PEN) :									9,65%	(PTD/CTN)

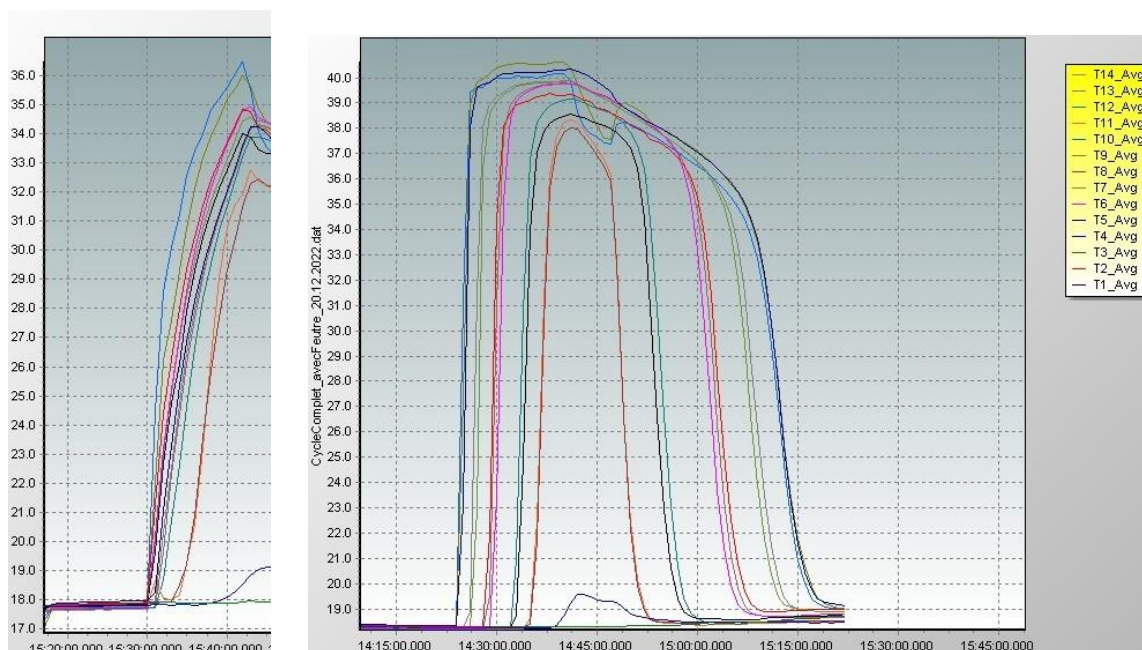
Tableau 18 : Phase de déchargement thermique de la Maquette (essai 19.12.2022)

8) Essai du 20 décembre 2022 : Charge et décharge complètes Maquette avec grille

Durant ce cycle, pour réduire à supprimer le brassage lors de l'injection d'eau chaude au sommet de la Maquette, une grille de répartition avec une nappe de feutre en fibre de verre est placée sous la rampe d'injection.



Figure 19 : Nappe de feutre sous la rampe d'injection dans la Maquette (répartiteur de flux d'injection d'eau)



Graphique 20 : Comparaison de stratification entre la phase de chargement, sans (fig.de gauche) et avec (fig. de droite) une grille + feutre de répartition du flux d'injection d'eau (débit identique) via la rampe sommitale de la Maquette

Phase de chargement thermique (CE) :

La Maquette (d'un volume de 77 litres) est (sur)chargée (136 %) en 17 minutes avec un débit moyen de 6,21 lit/min, soit 106 litres (Vi) d'eau à une température d'injection de 40°C. Par rapport à la température de la cuve ($\approx 18^\circ\text{C}$), soit un $\Delta T_c = 22.1\text{K}$, l'énergie-chaleur brute (CTB) injectée dans la Maquette est de 9.8 MJ (2,7 kWh).

$$\text{CTB} = V_i \cdot c \cdot \Delta T_c = 106 \cdot 4.186 \cdot 22.1 = 9.8 \text{ [MJ]} \quad 2.7 \text{ [kWh]} \quad (...)$$

Temps (h:m:s)	débit (Lit/min)	Cum volume (lit)	ΔT9 (°K)	ΔT10 (°K)	ΔTmoy-9-10 (°K)	Q (KJ)	Q max (KJ)	P max (kW)	Cumul Q (KJ)	Part Q (%)	Part volume maquette (%)
14:24:00	6,46	6,46	-0,09	-0,03	-0,06	-1,62	597,64	9,96	597,64	6,1%	8,3%
14:25:00	6,20	12,66	9,09	12,85	10,97	284,78	573,59	9,56	1 171,23	12,0%	16,3%
14:26:00	6,13	18,79	20,65	21,12	20,89	535,91	566,96	9,45	1 738,19	17,8%	24,2%
14:27:00	6,28	25,08	21,55	21,31	21,43	563,65	581,14	9,69	2 319,33	23,7%	32,2%
14:28:00	6,19	31,27	21,65	21,32	21,49	557,00	572,82	9,55	2 892,15	29,6%	40,2%
14:29:00	6,17	37,44	21,85	21,52	21,69	559,62	570,20	9,50	3 462,35	35,4%	48,1%
14:30:00	6,18	43,62	22,10	21,69	21,90	566,41	571,59	9,53	4 033,94	41,3%	56,1%
14:31:00	6,20	49,82	22,17	21,70	21,94	569,44	573,59	9,56	4 607,53	47,2%	64,0%
14:32:00	6,25	56,07	22,21	21,68	21,95	574,44	578,37	9,64	5 185,90	53,1%	72,1%
14:33:00	6,24	62,31	22,27	21,77	22,02	575,33	577,29	9,62	5 763,19	59,0%	80,1%
14:34:00	6,18	68,49	22,27	21,73	22,00	568,67	571,12	9,52	6 334,31	64,8%	88,0%
14:35:00	6,23	74,71	22,26	21,72	21,99	573,17	575,90	9,60	6 910,21	70,7%	96,1%
14:36:00	6,15	80,86	22,21	21,70	21,96	564,75	568,35	9,47	7 478,56	76,5%	103,9%
14:37:00	6,21	87,07	22,23	21,77	22,00	572,04	574,52	9,58	8 053,08	82,4%	111,9%
14:38:00	6,10	93,17	22,27	21,81	22,04	562,32	563,72	9,40	8 616,80	88,2%	119,8%
14:39:00	6,24	99,40	22,31	21,86	22,09	576,72	576,98	9,62	9 193,78	94,1%	127,8%
14:40:00	6,24	105,64	22,32	21,87	22,10	576,98	576,98	9,62	9 770,76	100,0%	135,8%
Débit moy. 6,21 Total (Lit) Temps : 17 minutes 8 496,46 (KJ) 2,36 (kWh) <= Avec inerties T9 et T10 ! Chargement Thermique Brute (CTB) : 9 770,76 (KJ) 2,71 (kWh) 100% (CTB) Chargement Thermique Nette (CTN) : 6 832,96 (KJ) 1,90 (kWh) 70% (CTN/CTB) Perte Thermique Chargement (PTC) : 2 937,81 (KJ) 0,82 (kWh) 30% (PTC/CTB)											

Tableau 21 : Relevé des paramètres durant la phase de chargement de la Maquette

La durée de chargement, de 17 minutes, est plus grande (265%) que les 6,4 minutes requises pour respecter l'échelle de temps (13'715) entre le Réservoir type d'ULISSE et la Maquette à échelle réduite. Celle-ci est principalement liée à la capacité insuffisante (6,2 lit/min \approx 50%) du débit d'eau chaude par le système d'alimentation à disposition dans le laboratoire d'essais.

Normalement le débit nécessaire pour remplir la Maquette devrait être de 12 lit/min (77 lit/6,4 min). Étant donné que la déperdition thermique de la Maquette est notamment proportionnelle au temps, la perte constatée est a priori aussi disproportionnée de 50%. Les relevés de températures et du débit (moyennés par minute) montrent, dans le tableau Excel (Fig. ...), que la perte thermique lors de la *phase de chargement* (PC) est de 30% (2.94 MJ ou 0.82 kWh). Dès lors, elle devrait se situer normalement à la moitié (15%) de l'énergie-chaleur brute (CTB).

La *Perte Thermique de Chargement* (PTC) est la somme de la déperdition par l'enveloppe (Qenv) et celle du Volume excédentaire d'eau injectée (Vex) au-delà de la capacité volumique de la Maquette (Vex \approx 106 – 77 = 29 lit). Cette dernière ne fait que traverser et emporter une part de l'énergie-chaleur (Qex) hors de la Maquette. Elle résulte à la fois de la compensation partielle de la perte d'enveloppe Qenv et de la dé-stratification thermique liée au flux descendant de chaleur par diffusion, par convection et par advection (dilution thermique par brassages multiples).

Toutefois, en situation réelle du Réservoir sous-lacustre ULISSE, la **Perte Thermique de Chargement (PTC) peut être partiellement compensée par un débit d'injection supérieure**. Ceci d'autant plus que l'énergie électrique d'alimentation des pompes serait d'origine photovoltaïque. Ce dernier sera largement excédentaire durant le chargement estival et son utilisation pour (sur)charger les Réservoirs ULISSE réduirait d'autant le « peak-shaving » des installations photovoltaïques (écrêtage de la production électrique par la mise à l'arrêt temporaire).

Phase de Stagnation Automnale (SA) :

La *phase de Stagnation Automnale (SA)* est de 6 minutes et respecte l'échelle de temps réel de 2 mois avant la Phase de Déchargement Hivernale (DH). La **Perte Thermique de Stagnation (PTS)** dans la Maquette est d'environ 416 MJ (0.12 kWh) soit **6 % de la Charge Thermique Nette (CTN)** (≈ 6.8 MJ ou 1.9 kWh). Elle est principalement liée au transfert de chaleur au travers de l'enveloppe mais aussi vers la dalle de fond de la Maquette (fond lacustre). Pour la Maquette elle se traduit par une chute de température moyenne de 1.3°C

Température Début Stagnation (TDS) :	39,45	(°C)	<= Température moyenne Fin Chargement (TFC)
Température Fin Stagnation (TFS) :	38,37	(°C)	Durée phase de Stagnation (DPS) : 6 minutes
Chute Température Stagnation (CTS) :	1,29	(°C)	6,1% (CTS/ATC)
Perte Thermique de Stagnation (PTS) :	415,80	(KJ)	0,12 (kWh) 6,1% (PTS/CTN)

Tableau 22 : Phase de stagnation automnale

Phase de Déchargement Hivernale (DH) :

Entre 14H47 et 15H20, le temps du déchargement de la Maquette est de 33 minutes (tdm). Normalement est devrait être de 19 minutes (tr) pour respecter l'échelle de temps réel de 6 mois correspondant au semestre d'hiver. Le débit étant limité par la capacité de la pompe au 3/4 requis (≈ 3 lit/min au lieu des 4 lit/min). À 15H12, soit en 26 minutes, les 77 litres du contenu volumique de la Maquette sont extraits et 88.7 % de la *Charge thermique Initiale de Déchargement (CID)*.

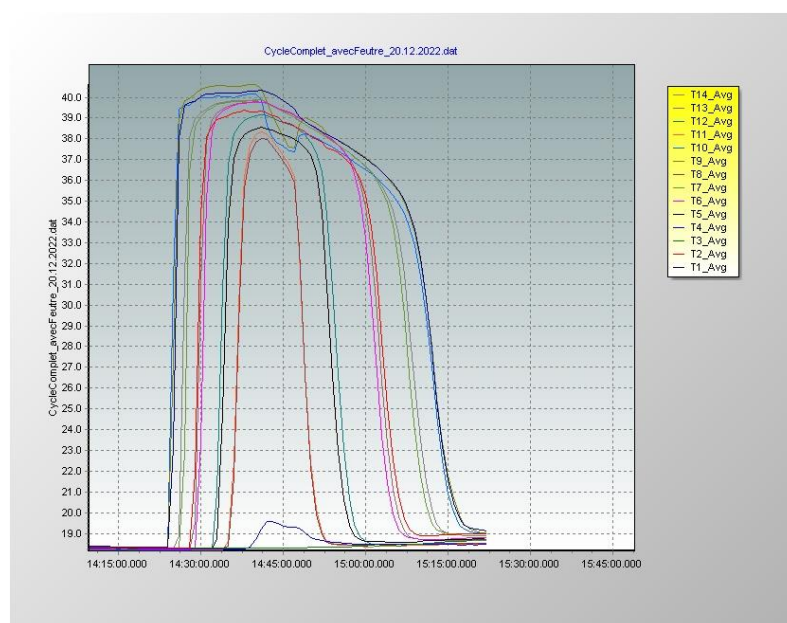
Durant cette période, comme lors du chargement, le flux descendant de chaleur par diffusion, par convection et par advection, transfert une partie de l'énergie-chaleur résiduelle vers l'eau froide qui s'introduit par le bas de la Maquette en remplaçant l'eau chaude extraite par le haut. De ce fait, la température moyenne de l'eau froide dans la Maquette acquiert 1.64 °C au-dessus de celle de la cuve et représente encore 218 MJ (0.06 kWh) d'énergie-chaleur (3.4 % du CID). Cette quantité résiduelle d'énergie-chaleur est extraite, entre 15H12 et 15H20 soit en 8 minutes, par le pompage de 23 litres supplémentaires jusqu'à atteindre pratiquement la température de la cuve (18.69°C). La *Perte Thermique de Déchargement* de la Maquette (PTDm) est de 0.51 MJ (0.14 kWh), soit 11.3 % du CID.



Graphique 23 : Débit de chargement et de déchargement thermique (débit exprimé en Hz ; 1 kHz = 1.67 lit/min)

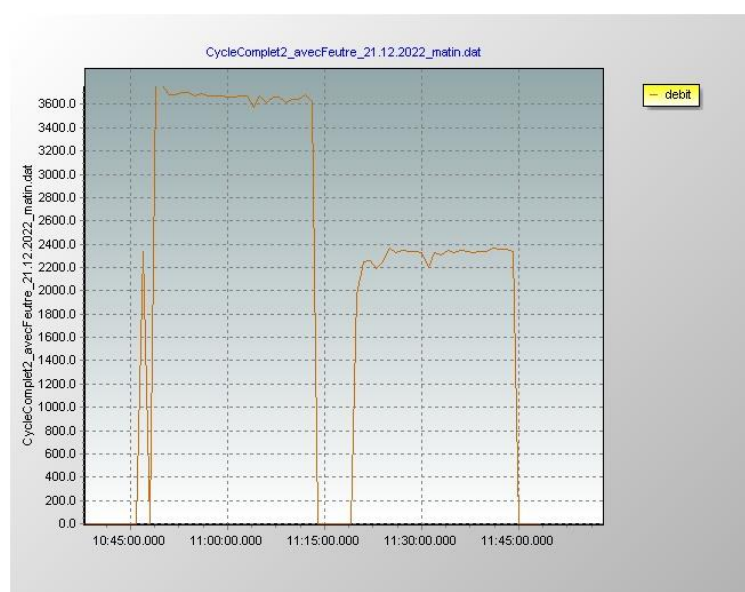
Temps (h:m:s)	débit (Lit/min)	Cumul Volume (lit)	ΔT9 (°K)	ΔT10 (°K)	Tmoy-9-10 (°K)	Q (KJ)	P (KW)	Cumul Q (KJ)	Part Q (%)	Part Volume Maquette (%)
14:47:00	3,02	3,02	19,23	19,06	19,15	241,76	4,03	241,76	3,8%	3,9%
14:48:00	3,01	6,03	20,37	19,85	20,11	253,38	4,22	495,14	7,7%	7,8%
14:49:00	2,97	8,99	20,69	19,95	20,32	252,20	4,20	747,34	11,6%	11,7%
14:50:00	2,97	11,96	20,57	19,82	20,20	251,21	4,19	998,56	15,6%	15,5%
14:51:00	3,01	14,97	20,39	19,67	20,03	252,38	4,21	1250,93	19,5%	19,4%
14:52:00	2,99	17,96	20,21	19,53	19,87	248,56	4,14	1499,49	23,4%	23,3%
14:53:00	2,89	20,85	19,89	19,39	19,64	237,18	3,95	1736,67	27,1%	27,0%
14:54:00	2,98	23,82	19,73	19,25	19,49	242,85	4,05	1979,53	30,8%	30,9%
14:55:00	2,99	26,82	19,58	19,07	19,33	242,01	4,03	2221,53	34,6%	34,8%
14:56:00	3,00	29,81	19,42	18,90	19,16	240,21	4,00	2461,75	38,4%	38,6%
14:57:00	2,99	32,80	19,21	18,72	18,97	237,24	3,95	2698,98	42,1%	42,5%
14:58:00	2,96	35,76	19,08	18,51	18,80	233,01	3,88	2931,99	45,7%	46,3%
14:59:00	2,99	38,75	18,90	18,34	18,62	233,18	3,89	3165,17	49,3%	50,2%
15:00:00	2,99	41,74	18,69	18,11	18,40	230,04	3,83	3395,21	52,9%	54,1%
15:01:00	3,00	44,74	18,46	17,90	18,18	228,30	3,81	3623,52	56,5%	58,0%
15:02:00	3,00	47,74	18,23	17,69	17,96	225,54	3,76	3849,06	60,0%	61,9%
15:03:00	2,99	50,73	17,97	17,42	17,70	221,60	3,69	4070,66	63,4%	65,7%
15:04:00	2,97	53,70	17,71	17,13	17,42	216,82	3,61	4287,47	66,8%	69,6%
15:05:00	2,98	56,69	17,36	16,83	17,10	213,37	3,56	4500,84	70,1%	73,5%
15:06:00	2,97	59,66	17,06	16,49	16,78	208,67	3,48	4709,51	73,4%	77,3%
15:07:00	2,94	62,60	16,54	15,97	16,26	200,16	3,34	4909,67	76,5%	81,1%
15:08:00	2,94	65,54	15,92	15,31	15,62	192,17	3,20	5101,84	79,5%	84,9%
15:09:00	2,91	68,45	15,04	14,39	14,72	179,35	2,99	5281,19	82,3%	88,7%
15:10:00	2,90	71,35	13,65	12,91	13,28	161,40	2,69	5442,59	84,8%	92,5%
15:11:00	2,90	74,25	11,75	10,92	11,34	137,44	2,29	5580,03	87,0%	96,2%
15:12:00	2,92	77,17	9,48	8,55	9,02	110,00	1,83	5 690,03	88,7%	100,0%
15:13:00	2,90	80,06	7,01	6,17	6,59	79,95	1,33	5769,99	89,9%	103,8%
15:14:00	2,90	82,96	4,78	3,93	4,36	52,78	0,88	5822,76	90,7%	107,5%
15:15:00	2,89	85,84	3,17	2,30	2,74	33,03	0,55	5855,79	91,3%	111,2%
15:16:00	2,88	88,72	2,10	1,40	1,75	21,07	0,35	5876,86	91,6%	115,0%
15:17:00	2,87	91,59	1,28	0,79	1,04	12,41	0,21	5889,28	91,8%	118,7%
15:18:00	2,87	94,45	0,83	0,57	0,70	8,40	0,14	5897,67	91,9%	122,4%
15:19:00	2,87	97,32	0,56	0,43	0,49	5,95	0,10	5903,62	92,0%	126,1%
15:20:00	2,86	100,19	0,42	0,34	0,38	4,55	0,08	5 908,18	92,1%	129,8%
2,94 Total (Lit) Temps total: 33 minutes Fin du déchargement : T9 et T10 = température cuve Débit ma (lit/min) Temps 100 % volume maquette: 25 minutes Charge thermique Initiale de Déchargement (CID) : 6 417,16 (kJ) Déchargement Thermique Nette (DTN) : 5 690,03 (kJ) Perte Thermique Déchargement (PTD) : 727,13 (kJ)										
1,78 (kW/h) 100,0% (CID) 1,58 (kW/h) 88,7% (DTN/CID) 0,20 (kW/h) 11,3% (PTD/CID)										

Tableau 24 : Phase de déchargement thermique Maquette

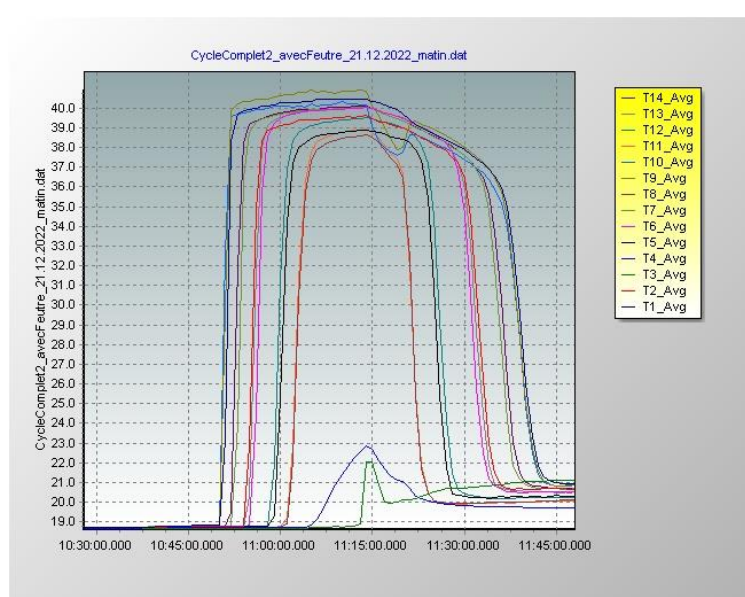


Graphique 25 : Relevé des températures dans la Maquette durant le cycle complet

9) Essai du 21 décembre 2022 (matin) : Cycle complet Maquette avec grille + feutre



Graphique 26 : Débit de chargement et de déchargement thermique (débit exprimé en Hz ; 1 kHz = 1.67 lit/min)



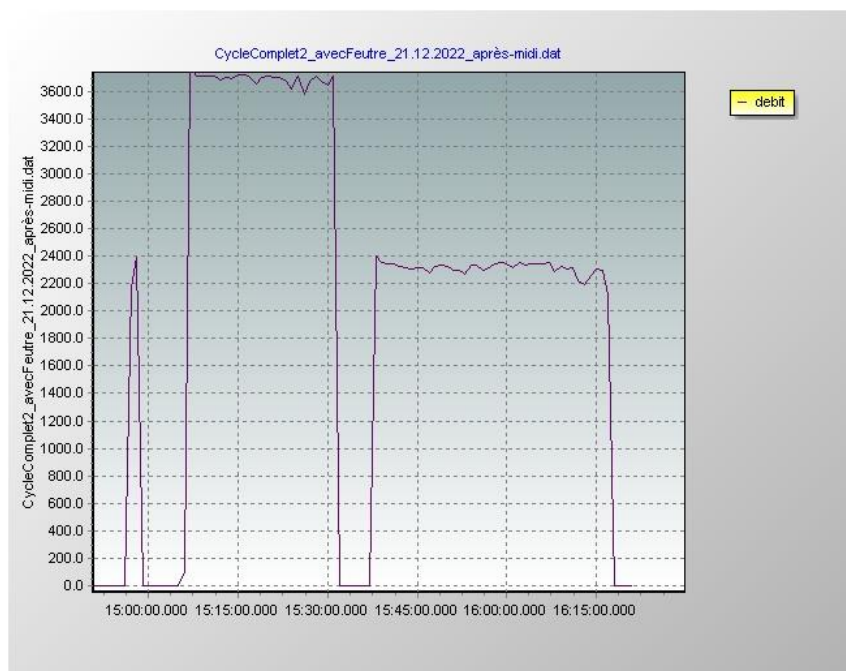
Graphique 27 : Relevé des températures dans la Maquette durant le cycle thermique complet

Remarque :

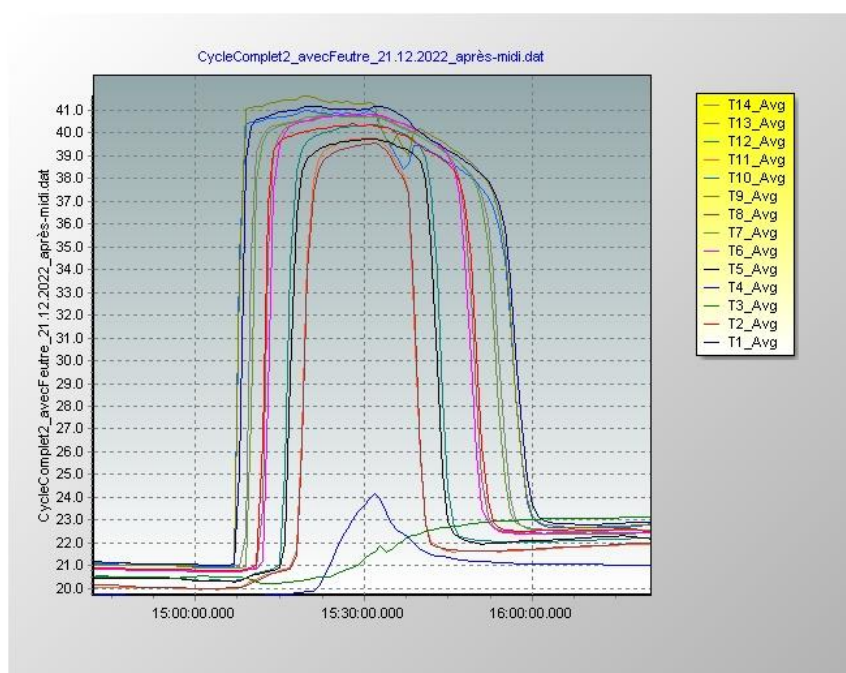
Le chargement prolongé de la Maquette a pour conséquence de chauffer significativement la cuve. La température de la cuve (TC3) augmente de 18.5 à 21°C. Elle a pour conséquence de réduire le potentiel thermique de la Maquette par rapport à la cuve mais aussi de réduire la perte thermique de la Maquette durant tout le cycle. Ceci s'observe aussi pour l'essai de l'après-midi.

L'augmentation du débit et à la fois la réduction du temps de chargement devrait permettre de limiter l'augmentation de la température de la cuve et donc mieux reproduire la stabilité thermique du lac.

10) Essai du 21 décembre 2022 (après-midi) : Cycle complet de la Maquette + feutre

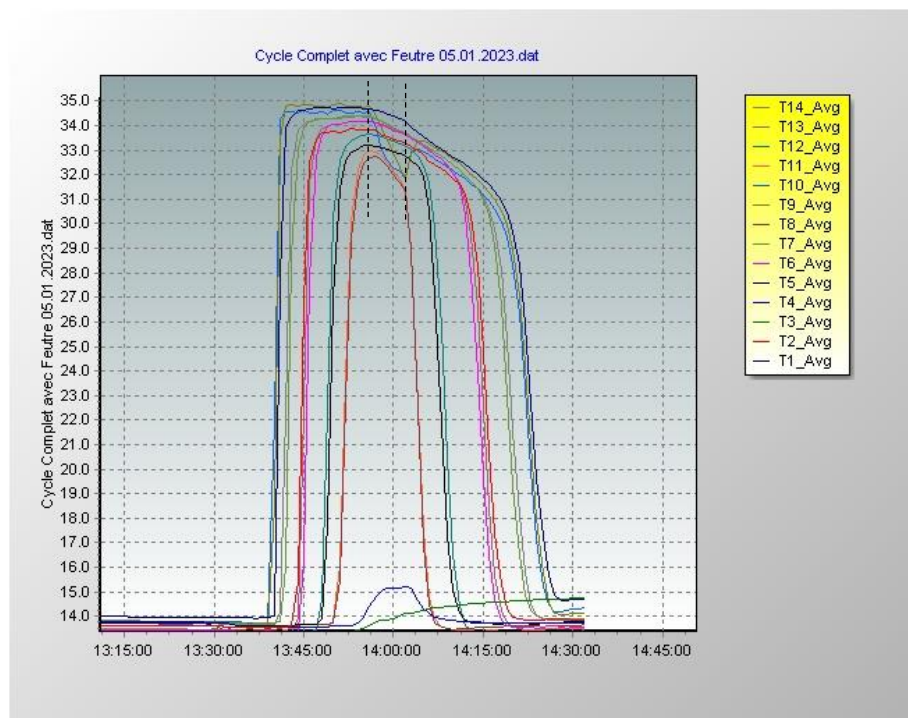


Graphique 28 : Débit de chargement et de déchargement thermique (débit exprimé en Hz ; 1 kHz = 1.67 lit/min)



Graphique 29 : Relevé des températures dans la Maquette durant le cycle thermique complet du 21.12.2022

11) Essai du 5 janvier 2023 : Cycle thermique complet de la Maquette avec feutre



Graphique 30 : Relevé des températures dans la Maquette durant le cycle thermique complet du 5.1.2023

Annex 2 : Mesure de la conductance hydrothermique de l'enveloppe du Réservoir ULISSE

Pour conforter le calcul théorique de la conductance thermique de l'enveloppe (§ 9) ainsi que pour affiner les paramètres de la simulation numérique (COMSOL), un dispositif expérimental a été réalisé. Il doit permettre de mesurer physiquement les caractéristiques « hydrothermiques » de l'enveloppe du Réservoir (perméabilité hydraulique et conductibilité thermique).

Pour mémoire (§ 4, pg. 4), l'enveloppe est isolée avec des « pavés » en verre cellulaire (FOAMGLAS-F, densité 165 kg/m^3 , ep. 50 mm), qui sont pris en sandwich entre trois couches de textiles techniques en fibre de verre type E. Lesdits pavés isolants, aux dimensions $0.45 \times 0.60 \text{ m}$, sont espacés par un bourrelet de feutre aiguilleté également en fibre de verre ou de basalte.

Pour réaliser ces mesures, une plaque de FOAMGLAS de 50 mm d'épaisseur est coupée "en croix" de façon à reproduire une surface d'enveloppe correspondant à la jonction de quatre pavés. Les bourrelets de jonctions intercalaires génèrent des "ponts thermiques et hydrauliques" (fuites de chaleur et d'eau). Ils augmentent la conductance thermique globale (pavés isolants + ponts thermiques) de l'enveloppe, qui doit être quantifiée.



Figures 1 : Caisson de mesures de la conductance thermique et hydraulique de l'enveloppe du Réservoir ULISSE

Les quatre morceaux de verre cellulaire (pavés) sont disposés entre les trois couches de fibre de verre et placés dans un caisson thermique, compartimenté en deux demi-caissons étanches et remplis d'eau. Ce montage doit permettre de reproduire la pression et la température différentielle de l'eau au travers de l'échantillon représentatif de l'enveloppe du Réservoir et ainsi de quantifier la perte spécifique de l'eau et de la chaleur au travers de l'enveloppe du Réservoir subaquatique d'ULISSE.

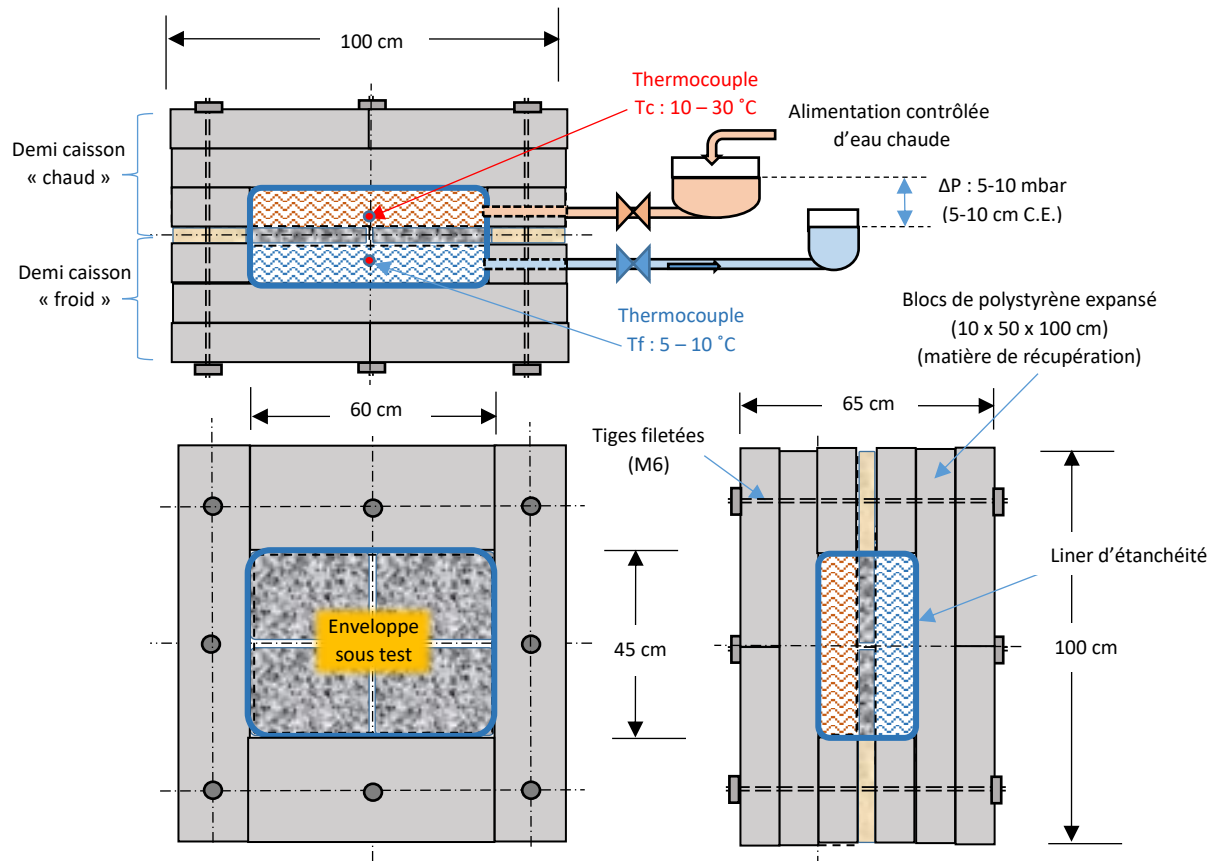
Un récipient supérieur (5 litres) d'eau chaude alimente le compartiment situé au-dessus de l'enveloppe à tester, de même qu'un récipient inférieur est relié au compartiment sous l'enveloppe. La différence d'hauteur (Δh), entre les deux compartiments, génère une pression hydrostatique différentielle sur l'enveloppe (Δp). Elle reproduit celle due à l'écart de densité ($\Delta \rho$) entre l'eau chaude dans le Réservoir et l'eau froide du lac environnant.

Cette pression différentielle est susceptible de générer des Fuites d'eau (Fe) au travers de la perméabilité hydraulique relative (μ) de l'enveloppe. En mesurant le débit d'eau (De) entre les deux récipients qui transite au travers de l'enveloppe, on peut déterminer le Débit potentiel de fuite d'eau (DFe) par unité de surface et de température du Réservoir ULISSE ($\text{DFe/m}^2 @ \text{Tr}$).

Toutefois, les premiers essais ont montré des problèmes d'étanchéité au niveau de la fermeture du caisson, ce qui fausse la mesure du débit de fuite DFe au travers de l'enveloppe. Pour des mesures précises, il faudra impérativement améliorer l'étanchéité du caisson (dans le cadre de la suite du projet ULISSE).

Indépendamment de ces problèmes de mesures, l'étanchéité hydraulique de l'enveloppe du Réservoir ULISSE peut être améliorée si nécessaire. Ceci par exemple avec un enduit imperméabilisant à base de silicone, PTFE, appliqué sur le textile du milieu de l'enveloppe (protégé du contact direct avec le lac). Cet enduit imperméabilisant serait limité à la partie supérieure du Réservoir, là où la pression hydrostatique est la plus importante. Néanmoins, la biocompatibilité de cet enduit reste à évaluer.

$$\Delta p = \Delta h * \Delta \rho * g \quad [\text{m.c.e.}] \quad (1)$$



Figures 2 : Caisson de mesures de la conductance - thermique et - hydraulique de l'enveloppe

En revanche, le calcul théorique de la Conductivité thermique de l'enveloppe du Réservoir, comprenant les pavés d'isolation, les joints intercalaires et les jonctions de bandes de l'enveloppe, a été néanmoins effectué.

Annexe 3 : Analyse d'un voile de cloisonnement hydrothermique

Les phénomènes, induisant des pertes *e(x)ergétiques*, pourraient éventuellement être partiellement limités par un « cloisonnement hydrothermique ». Ceci en interposant dans le Réservoir un voile mobil (Fig. 1) qui sépare l'eau froide à la base de celle chaude située au-dessus. Outre le fait de réduire le mélange de masses d'eaux de températures différentes, l'isolation thermique de ce voile réduirait également le transfert de chaleur par diffusion entre le compartiment supérieur et inférieur ainsi formé. Il reviendrait à consolider et maintenir le front plat de la thermocline interne au Réservoir.

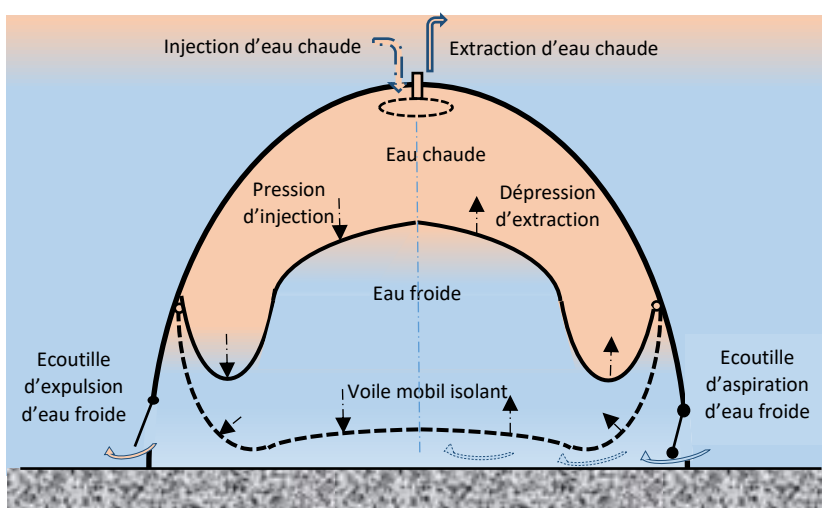


Figure 1 : Exemple du principe d'un voile d'isolement thermique du Réservoir avec circulation d'eau en recharge thermique (moitié gauche) et (moitié droite) en décharge thermique.

Les mouvements d'eau devraient être limités aux courants induits par l'introduction et l'extraction « volontaires » d'eaux au niveau desdits compartiments. Ceci par exemple à l'aide « d'écoutes » situées à la base du Réservoir, soit simplement être constitués par le faible espace libre entre le fond lacustre et la jupe sur le pourtour de l'enveloppe du Réservoir ($\approx 1'300$ m pour un Réservoir ULISSE de 500 m de longueur et d'un rayon transversal de 50 m).

La constitution matérielle du voile pourrait être similaire à celle de l'enveloppe hyperbolique externe du Réservoir. Avec la faible densité de l'isolant en verre cellulaire, le voile adopterait également une courbure convexe entre ses propres points d'encrage latéraux et aurait tendance à remonter spontanément ce qui obligerait à le maintenir en place à la hauteur voulu au moyen d'un encrage adéquat.

Si le voile était totalement étanche hydrauliquement avec l'enveloppe hyperbolique, son mouvement vertical se produirait, par effet piston, par la différence de pression/dépression exercée par la pompe de chargement/déchargement, telle une membrane d'un vase d'expansion hydraulique (Fig. 1).

Par contre, si le voile n'était pas totalement étanche, ce différentiel de pression serait plus faible ou inexistant par le débit de fuite entre le voile et l'enveloppe. Le mouvement et la hauteur du voile dans le Réservoir devraient alors être contrôlés par un **Dispositif de Positionnement Actif (DPA)** ; par exemple au moyen de câbles-poulies, contrepoids et de rails de guidage contre l'enveloppe du Réservoir (Fig. 2 ci-dessous). Ce système DPA viserait la différence maximale de température à l'interface du voile et se baserait sur le volume d'eau chaude (volume actif) dans le Réservoir.

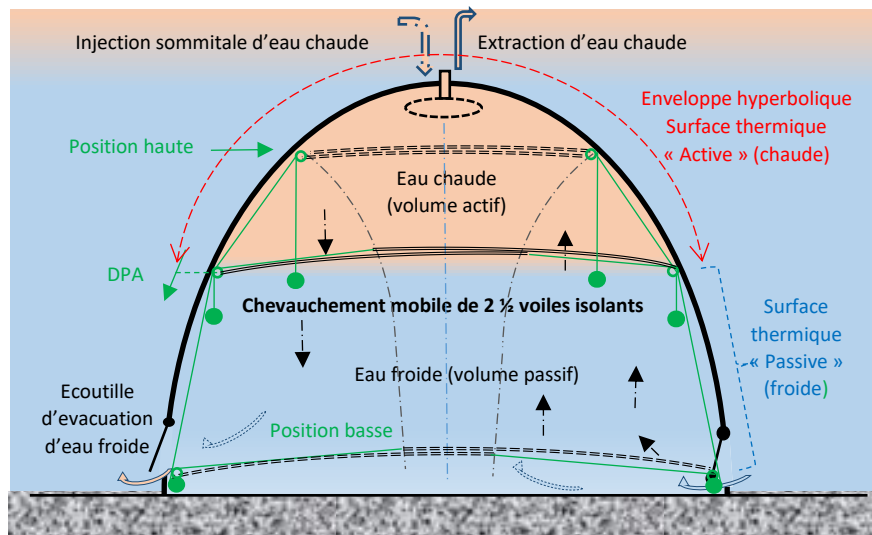


Figure 2 : Exemple d'un cloisonnement thermique par chevauchement mobile de deux demi-voiles d'isolement, contrôlé par un **Dispositif de Positionnement Actif (DPA)**. Moitié gauche de la figure = chargement thermique d'eau chaude (période estivale), à droite = déchargement thermique (hivernale).

Plus en détail à la figure 3 ci-dessous et selon l'exemple de la figure 2, chaque demi-voile est guidé verticalement par un rail contre un côté interne de l'enveloppe hyperbolique et tiré horizontalement vers le côté opposé à l'aide d'un contrepoids relié par un câble (en acier inoxydable). La roulette de guidage fixée à chaque demi-voile est retenue verticalement par un treuil motorisé. Ce dernier positionne verticalement ladite roulette de guidage le long du rail. Au final, les voiles pourraient éventuellement être lestés uniformément (p. ex. à l'aide de gravier) pour réduire leur poussée d'Archimède et les forces dans les câbles.

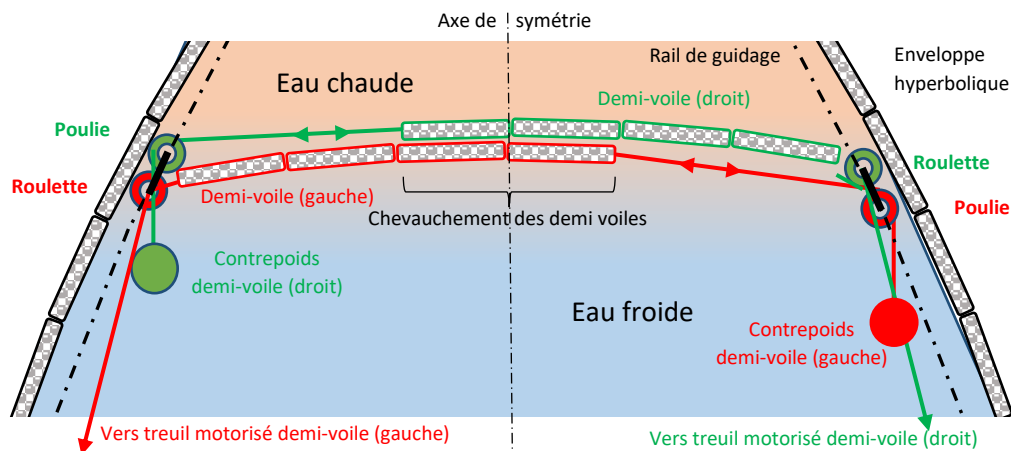


Figure 3 : Détail de fonctionnement d'un exemple du Dispositif de Positionnement Actif (DPA) des demi-voiles de cloisonnement hydraulique et de stratification thermique

Compte tenu de la courbure hyperbolique transversale du Réservoir et du débit (D) de chargement et de déchargement de l'eau chaude, la vitesse (V) du déplacement vertical du voile serait différente. Ainsi, malgré un débit (D) d'extraction d'eau constant, la vitesse (V) d'ascension du voile mobile augmenterait jusqu'à sa position haute, alors qu'inversement sa vitesse diminuerait lors de l'injection ou le chargement sommital d'eau chaude.

Dès lors que les deux demi-voiles auraient chacun une largeur égale à la moitié de la base transversale de l'enveloppe hyperbolique et qu'ils resteraient tendus horizontalement jusqu'à toucher, dans leur position haute, les deux bords transversaux de l'enveloppe (là où ils se chevauchent complètement), alors à Débit d'eau égale (D), la Vitesse de leur déplacement vertical (Vd) varierait dans le rapport de leur *Surface couvrante* (Sc), soit du simple (à la base) au double (au sommet) : $Vd = D/Sc$.

Selon les figures 2 et 3, le chevauchement des deux demi-voiles mobiles, fonction de leur hauteur dans le Réservoir, modifierait leur Surface (S_v) et, par l'épaisseur moyenne résultante, leur conductivité thermique (W/m^2K). Ceci réduirait la conductivité thermique surfacique de l'ensemble de l'enveloppe « active », comprenant la *Surface hyperbolique active* (Sh_a) et la Surface du voile mobile (S_v), à mesure que le volume « actif » d'eau chaude diminue et que sa surface globale décroît.

Indépendamment du déplacement du voile, sa conductivité thermique associée à celle de l'eau « immobile » ($0.6 W/mK$ par diffusion atomique ou moléculaire sans déplacement global de matière), produirait un transfert de chaleur à flux descendant de l'eau chaude vers l'eau froide au travers du voile.

Ainsi l'eau chaude se refroidirait, au contact supérieur avec le voile. En devenant plus dense elle aurait tendance à s'écouler vers le bas au travers des passages dans le voile. De manière inverse, l'eau froide sous le voile s'échaufferait et tendrait à remonter, freinée mutuellement par le contre-courant de l'eau chaude. Les déplacements résultants des masses d'eau seraient donc limités en intensité et seraient localisés à l'environnement immédiat du voile. Il se formerait alors une eau tempérée de densité intermédiaire au niveau du voile avec localement d'un étalement progressif du front de la thermocline interne.

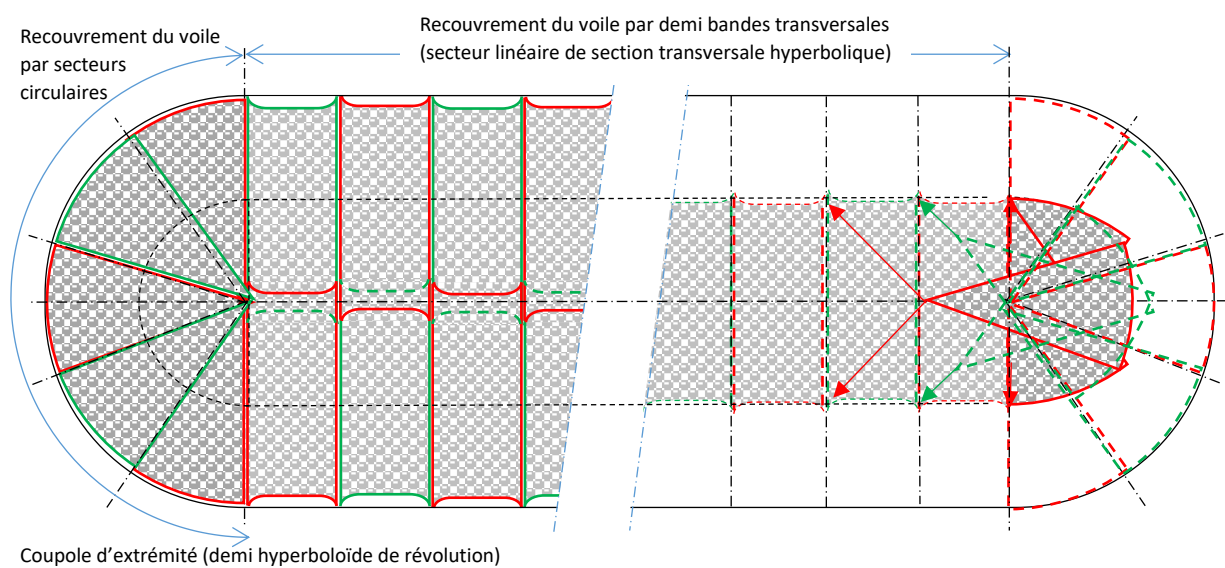


Figure 4 : Vue par-dessus du recouvrement du voile de cloisonnement hydrothermique, moitié gauche en position basse et moitié droite en position haute

Au prix d'une complexité certaine d'un tel dispositif, la fonction principale du voile serait donc de constituer un « cloisonnement hydrothermique » pour réduire les courants de convections et advections qui ont tendance à mélanger des eaux de températures différentes et réduire la stratification thermique (réduction de l'étalement du front de la thermocline interne au Réservoir).

Toutefois, les premiers essais sur la Maquette expérimentale ainsi que la simulation numérique (COMSOL Multiphysics) semblent montrer une certaine stabilité de la stratification thermique ou le maintien du front de la thermocline interne au Réservoir durant le cycle complet de fonctionnement.

À ce stade de l'étude exploratoire, l'usage d'un voile de cloisonnement hydrothermique pour le Réservoir ULISSE ne semble pas requis et n'est pas développé davantage mais au besoin reste en mémoire.

Annexe 4 : Analyse préliminaire des risques liés aux courants lacustres menaçant l'intégrité structurale d'ULISSE

Analyse préliminaire des risques liés aux courants lacustres menaçant l'intégrité structurale d'ULISSE

1. Introduction

Le projet ULISSE, conduit par Monsieur William van Sprolant, s'inscrit dans le programme d'encouragements SWEET de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN). Il vise à promouvoir l'emploi de l'énergie renouvelable, par une méthode innovante qui, au moyen d'un réservoir immergé dans un lac, emmagasine l'eau « chaude » en été et la rend exploitable en hiver pour une climatisation efficiente des bâtiments.

Si l'analyse de la faisabilité du projet ULISSE pour les aspects énergétiques notamment et d'implantation est bien avancée, celle des risques liés en particulier à l'hydrodynamique d'un lac doit encore être menée. Le spécialiste en hydraulique de HEPIA, le professeur Dr Zsolt Vecsernyés, met en garde sur la mise en danger de la structure immergée d'ULISSE par les courants puissants d'un lac et notamment si celui-ci est stratifié. En effet, la thèse de doctorat de Monsieur Vecsernyés (Vecsernyés, 1991) porte sur l'étude de l'hydrodynamique lacustre et des mécanismes de mélange entre les masses d'eau stratifiées du Léman.

Le présent document constitue un recueil des phénomènes physiques en jeu et une proposition des analyses à conduire au Laboratoire d'hydraulique appliquée (LHA) de HEPIA, pour identifier les contraintes sur la structure d'ULISSE afin de proposer des mesures de préservation de ses éléments structurels.

2. La genèse des courants lacustres

2.1. Les forçages

Les courants lacustres sont générés par ce qu'on appelle les « forçages » (Figure 1). Le plus important parmi eux est le **rayonnement solaire**. Il engendre les variations de pression et de température dans l'atmosphère, créant ainsi les **vents**. Sur les lacs, ils en résultent les **vagues** (ondes de propagation) provoquées par le frottement de l'air sur l'eau, et les **seiches** (ondes stationnaires) créées par un changement rapide et puissant de la pression atmosphérique. Les vagues créent des courants de surface dont l'effet ne s'étend que jusqu'à quelques mètres de profondeur. La seiche met en mouvement toute la masse d'eau d'un lac. Le rayonnement solaire modifie la structure des lacs, conduisant à leur **stratification thermique** qui évolue au fil des saisons. Les courants lacustres se comportent différemment suivant le degré de stratification d'un lac.

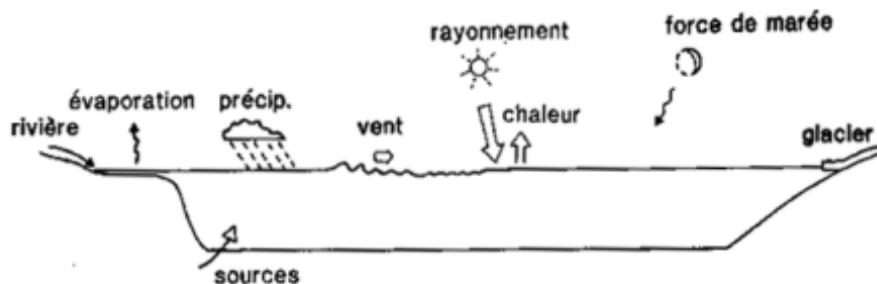


Figure 1 Forçages naturels, ayant un effet plus ou moins important sur la genèse des courants lacustres.

Le forçage lié à la **rotation de la Terre**, décrit par l'effet de Coriolis, dévie les courants lacustres suivant sur quel hémisphère se trouve le lac et à quelle latitude. Son influence est importante dans les grands lacs, comme le Léman.

L'**arrivée d'eau des rivières** et la sortie d'un débit du lac par son **émissaire** peuvent créer des courants lacustres locaux forts.

Les autres forçages ont un effet négligeable sur les courants lacustres, comme les marées, les précipitations, l'arrivée de faibles débits d'eau de surface ou souterraine et l'évaporation.

2.2. La stratification thermique

Au cours de chaque été, le rayonnement solaire réchauffe l'eau des lacs par la surface. Par son poids spécifique plus faible que celui des eaux fraîches des profondeurs, l'eau chaude reste en surface, qui au fil la saison conduit à la **stratification thermique** du lac par la formation de trois couches principales superposées, de densité et de température différentes (Figure 2). La couche supérieure d'eau chaude (20°C) d'une épaisseur de 20 à 30 m pour le Léman est l'**épilimnion**, la couche de transition de 5 à 30 m de mètres est la **thermocline** et la masse d'eau froide (7°C) qui s'étend jusqu'au fond est l'**hypolimnion**.

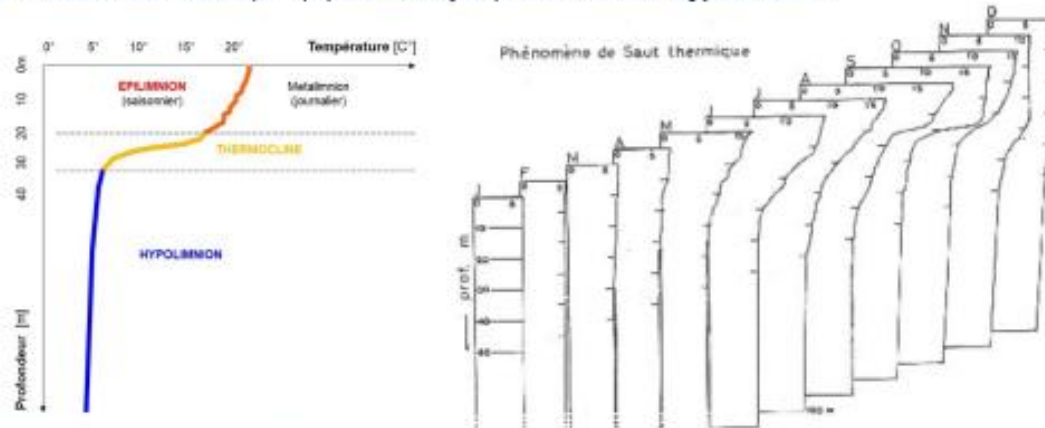


Figure 2 Gauche : Profil de température (°C) d'un lac profond, montrant sa stratification thermique estivale, avec l'épilimnion de surface, la thermocline de transition et l'hypolimnion des profondeurs. Droite : évolution de la stratification du Léman au fil des 12 mois de l'année (J : janvier ; D : décembre).

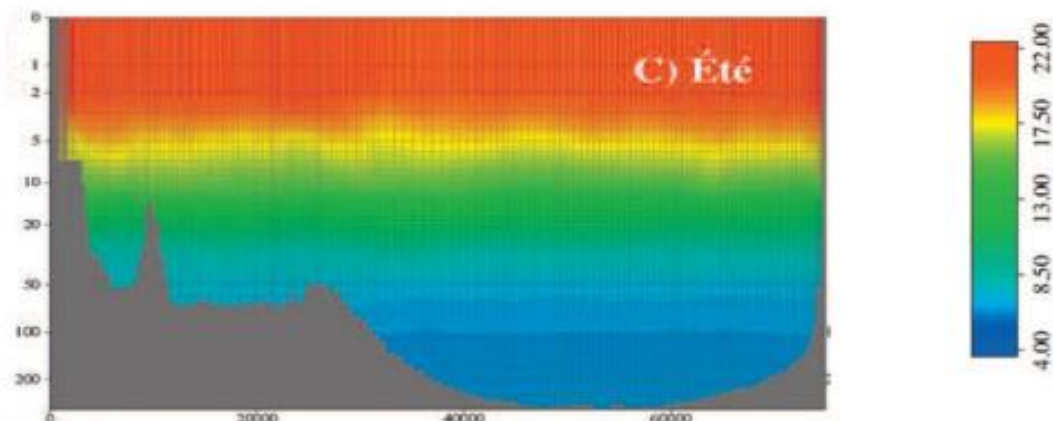


Figure 3 Profil de température (en °C) du Léman, de Genève (gauche) et à Villeneuve (droite), démontrant la stratification thermique estivale (Le Thi et al. 2012).

2.3. L'effet des vents dominants sur les courants lacustres

Les vents en général et plus encore les vents dominants, comme le Vent et de Bise pour le Léman (Figure 4), ont un rôle prépondérant sur le comportement des masses d'eau. Ils forment les vagues accompagnées d'un courant de surface (Figure 5), et les ondes stationnaires accompagnées de courants internes complexes (Figure 6). En agissant par la surface, les vents favorisent le mélange des masses par turbulence (Vecsemyés, 1991) et le transfert de l'oxygène, des nutriments et des panaches d'eau à température variable vers les profondeurs, en fonction de l'état thermique du lac.

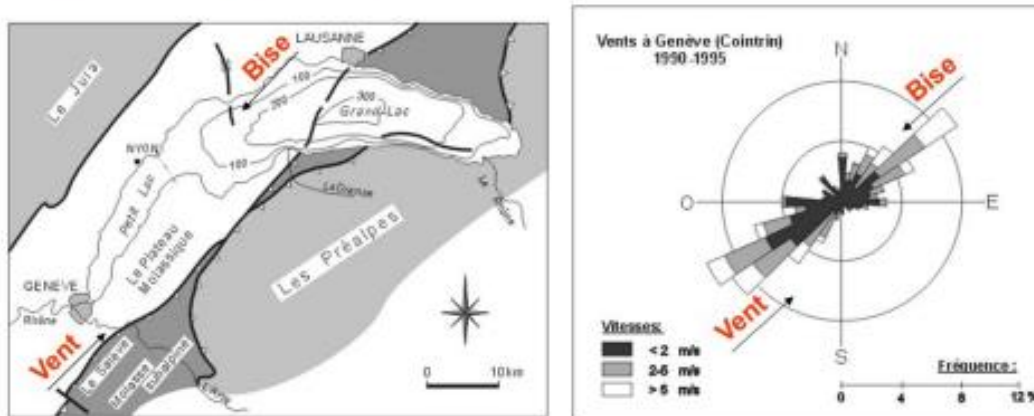


Figure 4 Vents dominants principaux du bassin Lémanique : le Vent venant du sud-ouest et la Bise du nord-est.

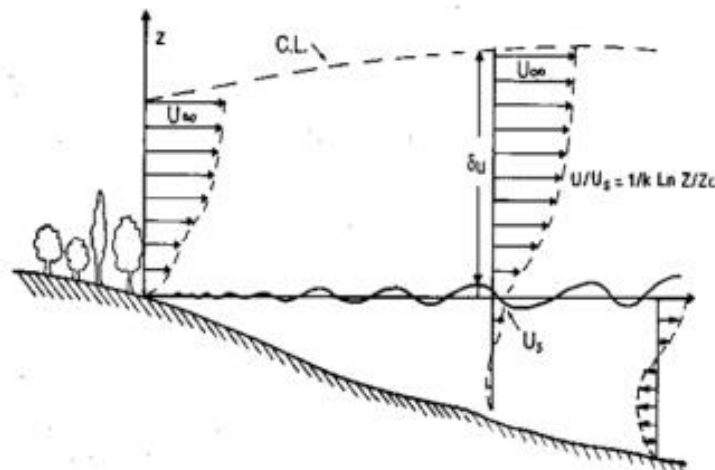


Figure 5 Les vagues et les courants de surface liés se forment par le frottement de l'air sur la surface du lac.

Les puissants vents dominants soufflant au-dessus d'un lac créés par un fort changement de pression provoquent l'oscillation de toute la masse d'eau, de nature similaire à la vibration d'une corde pincée d'une guitare. Ce phénomène d'onde stationnaire, étudié en détail la première fois par François-Alfonse FOREL à Morges (1895), est appelé la **seiche**.

La **seiche de surface** possède une amplitude de quelques décimètres, 20-30 cm pour le Léman. Un courant de surface est créé dans le sens du vent, accompagné d'un courant de retour plus faible passant par le fond lacustre (Figure 6).

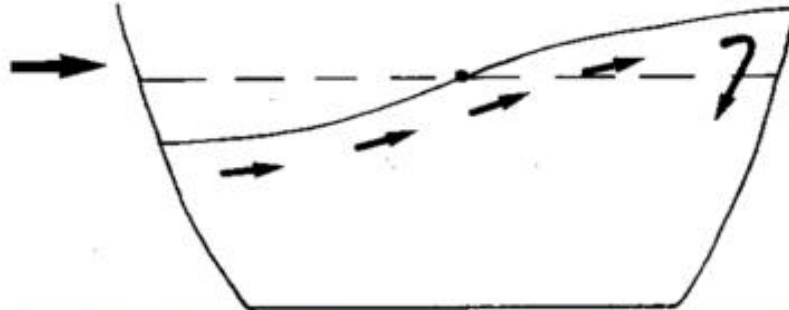


Figure 6 La seiche se forme sous l'effet d'un fort vent brusque dû à un changement de pression atmosphérique. L'oscillation observable à la surface (seiche) engendre un courant de surface dans le sens du vent et un courant de retour plus faible par le fond.

Avec la stratification thermique estivale, l'oscillation de l'épilimnion entraîne, en opposition de phase, celle de la thermocline appelée **seiche interne**, et donc de l'hypolimnion sous-jacent. Dans l'épilimnion, le courant de surface s'écoule dans le sens du vent, celui de l'hypolimnion s'écoule en sens opposé (Figure 7).

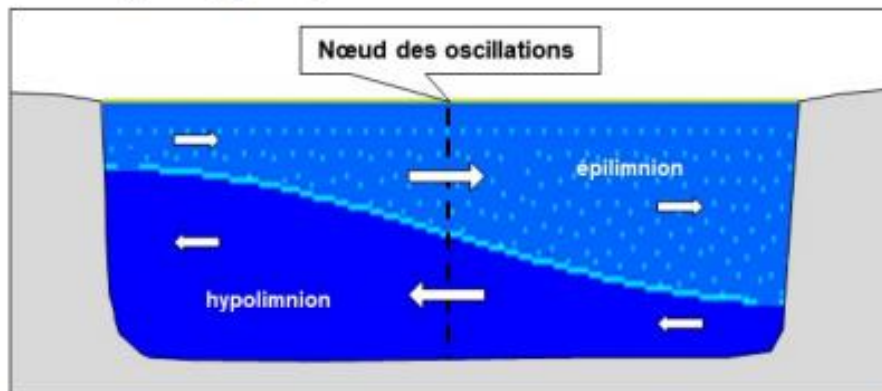


Figure 7 Due à la stratification thermique les courants engendrés par un épisode de seiche et seiche interne s'opposent entre l'épilimnion et l'hypolimnion. Les plus forts courants se créent sous le(s) nœud(s) d'oscillation.

L'oscillation de la thermocline peut atteindre une dizaine de mètres d'amplitude dans le Léman (Vecsernyés 1991), avec une périodicité de 10-12 h (Figure 8). Les courants s'inversent par la demi-fréquence des oscillations, toutes les 5-6 h.

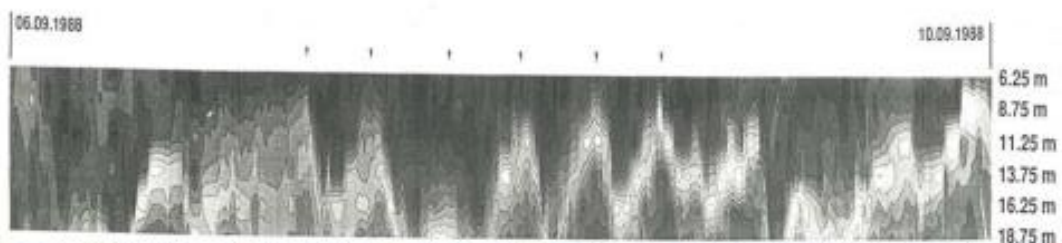


Figure 8 L'oscillation de la thermocline (seiche interne) possède une périodicité de 10-12 h dans le Léman. Ces ondes internes ont une amplitude d'une dizaine de mètres. Vecsernyés, 1991.

2.4. L'effet de Coriolis influençant les courants lacustres

La rotation de la Terre joue un rôle déterminant sur le positionnement des plus forts courants des lacs de grande taille. Le courant généré par une forte Bise (pour le Léman) persiste jusqu'à 72 h, suffisant pour que la Terre fasse plus d'une rotation autour de son axe. Sur l'hémisphère nord, le **courant** propulsé sur une trajectoire rectiligne par la seiche sous l'effet d'un vent puissant **est « dévié » sur la droite**, qu'ils s'agissent du Vent ou de la Bise (pour le Léman). C'est l'effet de Coriolis.

Ainsi, en se plaquant contre les côtes, les plus forts courants se créent dans le Grand-Lac de manière systématique le long de la côte nord suisse s'écoulant d'est en ouest et la côte sud française d'ouest en est (Vecsernyés 1991, Le Thi et al. 2012), (Figure 9, Figure 10).

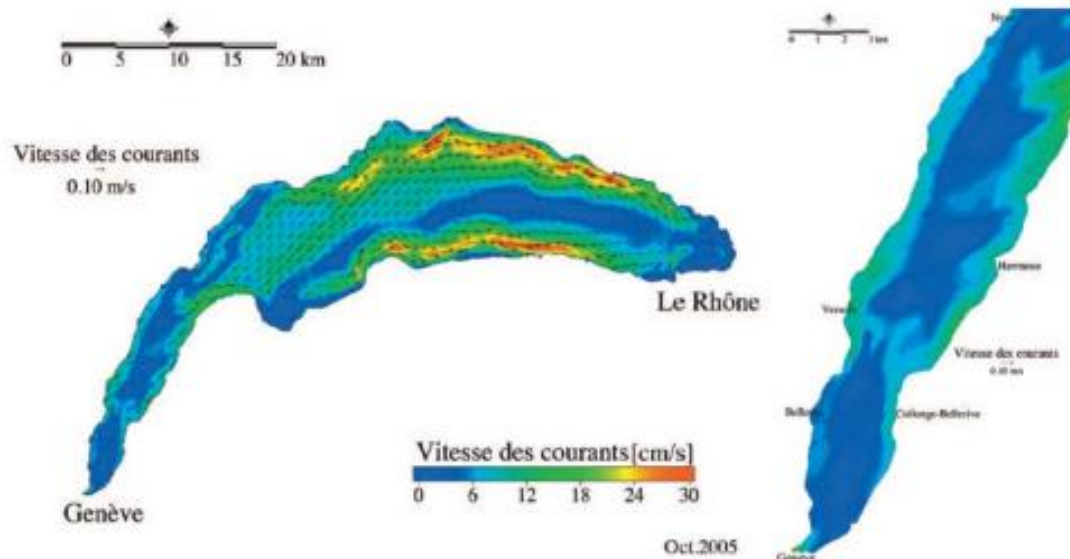


Figure 9 Les vents dominants créent, par les épisodes de seiche notamment, des courants systématiques. Ils sont déviés par l'effet de Coriolis sur la droite, et longent les côtes sud et nord du Grand-Lac dans le Léman. Le Thi et al. 2012.

L'étirement et l'aplatissement verticaux des masses d'eau créent des **courants horizontaux d'advection** (Figure 10), pouvant atteindre 30-40 cm/s le long des côtes.

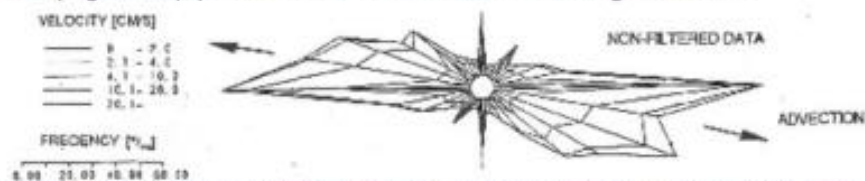


Figure 10 Courant d'advection mesuré à Ouchy (Suisse, côte nord du Léman), formé par la Bise et dévié par l'effet de Coriolis. Vecsernyés, 1991.

3. Risques sur le réservoir ULISSE liés aux courants lacustres

Le réservoir ULISSE se déploiera entre 10 m et 60 m de profondeur (Figure 11), avec sa voile et son système d'ancrage qui l'attache au fond lacustre.

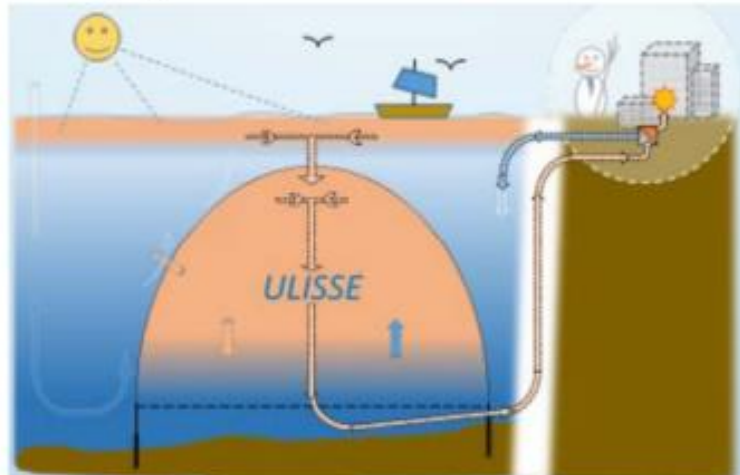


Figure 11 Immersé dans un lac stratifié, le réservoir ULISSE pourra s'étendre de l'épilimnion jusqu'à l'hypolimnion, en traversant la thermocline.

Les vagues sont des ondulations de faible amplitude diminuant depuis la surface avec la profondeur, jusqu'à ne plus avoir d'effet au-delà d'une dizaine de mètres dans les lacs. Le courant de surface lié se cantonne aux premiers mètres. Ces phénomènes ne constitueront donc pas de risque pour ULISSE, même lors d'une tempête.

Les seiches de surface et internes en revanche, provoquent le déplacement massif de l'eau.

En hiver, par l'absence de la stratification thermique, les plus forts courants se manifestent dans la masse d'eau supérieure, mais un courant de retour plus faible se crée par le fond.

En été, due à la stratification thermique, la seiche engendre le déplacement massif des eaux de l'épilimnion et dans le sens opposé celui de l'hypolimnion. Les plus forts **courants horizontaux** se trouvent dans la verticale du(des) nœud(s) des oscillations (Figure 7).

ULISSE subira les courants internes du lac au fil des saisons sans ou avec la stratification thermique de la colonne d'eau. En été, la partie supérieure de la voile pourra se trouver dans l'épilimnion, sa partie centrale traversera la thermocline et sa partie inférieure s'étendra dans l'hypolimnion. Lors des seiches internes, elle sera ainsi exposée à **l'effet de cisaillement** dû aux courants puissants opposés de l'épilimnion et de l'hypolimnion. De surcroît, le sens de ces courants change toutes les 5 - 6 heures, correspondant à la moitié de la période d'oscillation de la seiche. Ces courants engendreront des mouvements, des déformations et des efforts internes de l'enveloppe d'ULISSE ainsi que ses ancres. Si l'enveloppe du réservoir est ouvert par le bas, sa **déformation cyclique** expulsera de précieux mètres cube d'eau chaude stockée, pour aspirer ensuite de l'eau froide.

En conclusion, provoquées par les vents dominants, les courants lacustres puissants et oscillants des seiches constituent un danger, auquel le réservoir ULISSE sera exposé au cours de son exploitation, ce qui présente un risque sur la stabilité structurale et de la pérennité de ULISSE. Afin de connaître le comportement de la voile et de ses ancres et les efforts mécaniques qui y naîtront, il serait important d'étudier les phénomènes hydrodynamiques et de stabilité structurale d'ULISSE de manière appropriée par des spécialistes, dans un laboratoire d'hydraulique.

L'emplacement du réservoir ULISSE doit être défini avec attention. Sa taille projetée (50m de haut, 100m de large, 500m de long) pourrait avoir un impact sur les courants lacustres, d'autant plus si plusieurs unités sont implantées en parallèle. La réduction de la section mouillée du lac **accentue la vitesse de courant**, en tout cas dans la proximité d'ULISSE. Ces aspects également devront faire l'objet d'analyses hydrodynamiques par un spécialiste.

4. Etudes hydrauliques proposées

4.1. Modèle physique

A la lumière des éléments théoriques présentés sur les courants lacustres au chapitre 2 et des risques démontrés sur la stabilité structurale de la voile et les ancrages d'ULISSE au chapitre 3, le Laboratoire d'hydraulique appliquée (LHA) de HEPIA propose de concevoir un modèle physique hydraulique spécifique et de conduire une recherche appliquée dédiée. Les analyses porteront d'une part sur le comportement général d'ULISSE face aux phénomènes hydrauliques liées aux seiches de surface et internes, et sur les efforts structuraux provoqués dans ses ancrages.

Le modèle physique permettra de

- créer les conditions d'une masse d'eau stratifiée, et non stratifiée ;
- générer les seiches de surface et internes de la masse d'eau, par un dispositif mécanique conçu pour le modèle ;
- suivre et enregistrer la fréquence d'ondulation des seiches de surface et interne, au moyen de sondes UVP (Ultrasound velocity probe) ;
- enregistrer les vitesses de courant en différents points horizontaux et verticaux stratégiques de la masse d'eau, au moyen de sondes UVP ;
- mesurer les efforts dans les ancrages au moyen de jauges de contrainte installées.

La construction et l'instrumentation du modèle physique se fera par les collaborateurs du Laboratoire d'hydraulique appliquée et des étudiants en cours formation bachelor de HEPIA. **Le calibrage** du modèle aux conditions hydrodynamiques est prévue par les collaborateurs du LHA, avec les instruments de mesure appropriés. La **recherche** scientifique sera menée par les collaborateurs du LHA et des étudiants bachelor voire master de la HES-SO.

Au cours des analyses, des échanges de travail sont prévus entre spécialistes, des visites sont proposées pour les mandants et financeurs de l'étude ainsi que les administrations et le public scientifique. A la fin de la recherche un rapport technique sera rédigé en français.

La durée de ces opérations est estimée, du début de la construction jusqu'à la fin des études, environ 18 mois.

4.2. Simulation numérique

Les courants lacustres seront influencés par le(s) réservoir(s) ULISSE. L'impact d'ULISSE sur l'hydrodynamique lacustre devrait être étudié par simulation numérique hydrodynamique 2D ou 3D. Les configurations hydrodynamiques à analyser sont :

- La réduction de la section mouillée du lac par un ou plusieurs réservoirs, modifiant le champ de courant lacustre ;
- La déformation cyclique du réservoir par la seiche, créant des courants d'échange entre le volume d'eau stockée par ULISSE et celui se trouvant à proximité.

Le LHA est tout à fait à même à modéliser l'hydrodynamique lacustre liée à ULISSE en 2D et en 3D, avec les logiciels Mike 21 (DHI) et respectivement Flow 3D (Flow science). Le **montage des modèles**, leur **calibrage** et les premières **analyses** pourraient être réalisés par les spécialistes du LHA et un(e) étudiant(e) bachelor ou master de la HES-SO. Les analyses détaillées devraient être conduites par les spécialistes du LHA et un(e) étudiant(e) master.

Au cours des analyses, des échanges sont prévus entre spécialistes de l'hydraulique et de la thermique du projet ULISSE. A la fin de la recherche un rapport technique sera rédigé en français.

Afin d'harmoniser tous les projets conduits par les experts, une durée totale comparable à celle de la modélisation physique devra être pour les simulations hydrauliques numériques.

4.3. Valorisation de la recherche

Le Laboratoire d'hydraulique appliquée de HEPIA se réserve le droit de valoriser les résultats de la recherche dans des revues scientifiques et des congrès nationaux et internationaux.

Des présentations grand-public, dans des forums des associations professionnelles (ex. ARPEA, VSA, SIA), tout comme la parution des articles dans la presse écrite et télévisée, devront aussi être programmées.

Bibliographie

Forel, François-Alfonse, 1895, FOREL FA. 1895. Le Léman. Tome 2. F. Bouge, Lausanne

Le Thi, A.D. ; De Pascalis, F. ; Umgieser, G. ; Wildi, W., 2012, Structure thermique et courantologie du Léman, UNIGE

Lemmin, U. ; Mortimer, C.H. ; Bäuerle, E., 2005, Internal seiche dynamics in Lake Geneva, Limnology and Oceanography, 50(1), 2005, 207–216, American Society of Limnology and Oceanography, 2005, by the American Society of Limnology and Oceanography, Inc.

Vecsernyes, Zsolt, 1991, Horizontal mixing dynamics in the upper layer of Lake Geneva, Thèse de doctorat n° 943 - EPFL, Suisse

Vecsernyes, Z. ; Lemmin, U. ; Graf, W.H., 1988 On the fine-scale mixing in the metalimnion and the seasonal thermocline of the Lemman (Lake Geneva, Switzerland), Activities Report of the Hydraulics Research Laboratory 17 p (SEE N90-25281 19-34) - EPFL, Suisse

Vecsernyes, Z. ; Lemmin, U. ; Graf, W.H., 1990, Horizontal turbulent mixing dynamics on large-scale and fine-scale in Lake Geneva, Activities Report of the Laboratory for Hydraulic Research 18 p (SEE N91-20432 12-34) - EPFL, Suisse

Genève, le 18 juillet 2022

Prof. Dr Zsolt VECSENYES
Dir. du LHA de HEPIA

Annexe 5 : Simulation of an Under Lake Infrastructure for Capture and Storage of Solar Energy (ULISSE), COMSOL Conference Munich 2023 [66]



Simulation of an Under Lake Infrastructure for Capture and Storage of Solar Energy (ULISSE)

D. Bello-Mendes¹, R. Rozsnyo¹, W. van Sprollant²

¹hepia, HES-SO, Geneva, Switzerland

²CvS Énergies sàrl, Geneva, Switzerland

Abstract

In this paper we present a Comsol Multiphysics simulation model of a reduced size ULISSE mock-up. The mock-up is immersed in a container, playing the role of the lake. Both are filled with water at the room temperature. Then starts a cycle imitating the change of seasons. Hot water at 33.5 °C is injected by a pump in the ULISSE mock-up chasing the initial water. After a period of rest, the water is pumped back. The recovered energy is calculated. Real-time measurements are made by temperature sensors and water flow sensors allowing comparisons with the simulation results.

Keywords: Renewable Energies, Lacustrine Thermal Energy, Energy Storage, Multiphysics Simulation

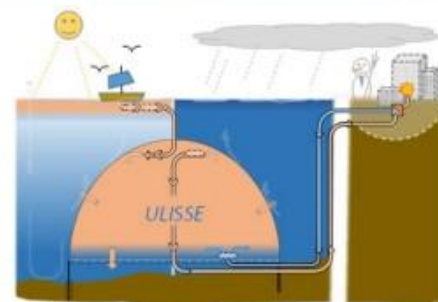
Introduction

The transition from fossil fuels to renewable energies requires finding new sources of energy. It turns out that the hydrothermal potential of the lakes would cover a significant part of these renewable energy needs [1]. The existing Thermal Lacustrine Networks (TLNs) are efficient in summer allowing the building air conditioning by « free-cooling » (without heat pumps) thanks to the cold water pumped from the bottom of the lakes. However, in winter, the heating of the buildings is 4 to 5 times less efficient due the use of heat pumps and because of the lower temperature differential of the water round-trip of the lakes. The ULISSE project, supported by the Swiss Federal Office of Energy, aims to build an underwater tank made of a semi-rigid envelope that could be filled with the warm water pumped from the surface of the lakes, heated by the sun during the hot season and to keep that water as warm as possible thanks to the thermal insulation properties of the envelope until the cold season [2]. In winter, that water would be pumped back from the tank. The higher temperature (versus normally at the lake bottom) of the pumped water would allow to reduce by 95% the pumping energy and thus provide an important heat source for the heat pumps (twice their efficiency) of the said TLNs (Fig. 1). This concept reproduced over the fifteen largest lakes in Switzerland would allow to economize 3 TWh of electricity consumption during the winter [3].

Experimental Set Up

The ULISSE tank immersed under a lake is a huge construction challenging many fields of engineering. Before trying to build such a tank, it made sense to prove the concept over a reduced size mock-up and

to study the ability of the system to store the solar energy (Fig. 2). The experimental model makes it possible to reproduce the different operating phases of the ULISSE tank to analyze and establish the efficiency of its sub-lacustrine seasonal energy-heat



Under Lake Infrastructure for thermal capture and Storage of Solar Energy

Figure 1. Illustration of the ULISSE principle.



Figure 2. The reduced size ULISSE mock-up.

storage capacity. The autumn stagnation phase is used to establish the stagnation heat loss and the cooling time constant characteristic. In addition, the experimental model also makes it possible to reproduce and measure the heat exchange flows, during the « dynamic » phases, of summer loading of temperate water and winter unloading. The test model (Fig. 2) has a reduced scale of 1/175th. At the two longitudinal ends, the envelope is « strongly insulated » (pseudo athermal walls) by a 4 cm thick extruded polystyrene plate. The hyperbolic envelope of the mock-up is reduced to a thin (2 mm) and transparent sheet of polycarbonate. This sheet (62 x 90 cm = 5'580 cm²) is curved in its large dimension (90 cm) and is fixed at the base between two threaded stainless steel rods spaced 57 cm apart and a third located at the top. Two other threaded rods are still placed halfway up. These threaded rods are used to hold the enclosure between the two end insulating plates. The resulting curvature being close to the hyperbola with an average radius of 30 cm. The corresponding volume of the mock-up is 77 liters.

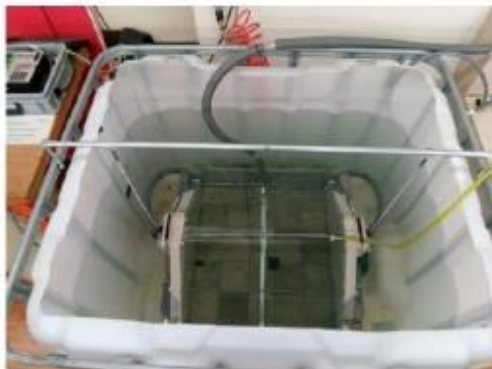


Figure 3. The reduced size ULISSE mock-up immersed in a container.

As a first approximation, this makes it possible to neglect the longitudinal heat loss of the experimental model and to highlight the predominance of the transverse heat loss of the envelope, including that by the lake bottom as well as the free convection which tends to reduce the stratification internal, leading to energetic losses.

The mock-up is placed in a plastic IBC container with a 1'000 liter frame (Fig. 3), fixed on a plastic pallet (120 x 100 cm). The ratio between the volume of water in the tank and the mock-up is a maximum of 12. For the introduction of the mock-up, a rectangular opening (100 x 80 cm) is made at the top of the tank. The mock-up is maintained on the bottom of the container (against the Archimedes thrust of the PSX end plates), by a ballast made of 4 stainless steel flats (10 kg gross recovery) and by the support of two adjustable retaining rods from the

tank structure. The lower opening of the mock-up is placed on two layers of concrete pavers (total thickness 8 cm) reproducing the conductivity and the thermal capacity of the lake bottom.

The temperature of the water in a real ULISSE type reservoir is a priori around 20°C while that at the bottom of the lake is 5°C, i.e. a difference of 15°C. The experiments on the mock-up are made with a supply from the domestic hot water and cold water network. The temperature is regulated by a conventional shower mixer and an intermediate thermal stabilization tank (Fig. 4). For example, with a temperature difference of 15°C and considering the ratio between the volumes of water between the mock-up and the container, the temperature of the container can gradually increase by about 1°C if it is insulated and not cooled.



Figure 4. The water thermo-regulation system.

Measurements

The mock-up is equipped in its upper part with a ramp for injection and extraction of temperate water to reproduce the summer loading and the winter unloading of energy in the form of heat (Fig.5).



Figure 5. The injection-extraction ramp.

The temperature and water flow measurements at the level of the ramp make it possible to quantify the heat-energy introduced and extracted from the mock-up over a complete cycle (pseudo-annual). The measurements are mainly thermal in order to know the temperature and also to indirectly deduce the convective movements of water in the mock-up as well as those in the container representing the lake. The temperature probes (Fig. 6) are type K thermocouples and are placed in the mock-up on a transverse PVC support which can be moved longitudinally as well as on the upper water distribution/extraction ramp. Nine thermocouples

are placed, in pairs, at different heights on the transverse support; one on the central axis and the other on the side edge of the support as well as two laterally (in position or opposite end) on the summit ramp (Fig. 7, 11). As shown by Figure 2, the support is placed in the transverse symmetry plane of the mock-up. The thermocouples are connected to a micro logger measurement and data acquisition interface (CR3000 from Campbell Scientific). The latter also records the flow rate/volume of loading and unloading hot water from the mock-up, via the pulse flow meter located on the hydrothermal supply plate.



Figure 6. Type K thermocouples.



Figure 7. The cross support of thermocouples.

Governing Equations

Fluid flow modelling

We assume the water flow in the system laminar and incompressible. The flow is due to the natural convection and the injected water. Thus, the equations governing the flow are the Navier-Stokes equations without taking into account the viscosity of the water. The momentum conservation is given by Eq. 1:

$$\rho_w \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho_w (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \rho_w \mathbf{g}, \quad (1)$$

where, \mathbf{u} is the velocity field, \mathbf{g} the gravity field, ρ_w the water density and p the pressure scalar field. This

equation must be completed by the equation of the mass conservation, Eq. 2:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (2)$$

However, to take into account the effects of the gravity field, we used the Boussinesq approximation on the density [4]:

$$\rho_w = \rho_{ref} (1 - \alpha_p) (T - T_{ref}), \quad (3)$$

where ρ_{ref} is the reference density of the water, i.e. at the reference temperature, $T_{ref} = 20^\circ\text{C}$, and α_p is the dilatation coefficient at constant pressure at the reference temperature given by Eq. 4:

$$\alpha_p = -\frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial \rho_w}{\partial T} \right)_p. \quad (4)$$

Eq. 1 and Eq. 2 must be completed by the boundary and the initial conditions. The boundary conditions are on the walls (interior and exterior) $\mathbf{u} = \mathbf{0}$ and on the free surface $p = p_{ref}$ where p_{ref} is the atmospheric pressure. At the initial conditions, corresponding to $t = 0$, the water has a velocity field $\mathbf{u} = \mathbf{0}$ and a pressure field given by the relation $p = p_{ref} + \rho_w \mathbf{g} \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_{ref})$ where $\mathbf{g} \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_{ref})$ corresponds to the hydrostatic pressure.

Heat transfer in solids and fluids modelling

The heat transfer in all media is governed by Eq. 5:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T - \nabla \cdot (-k \nabla T) = 0, \quad (5)$$

where, ρ is the density of a given medium, C_p its heat capacity at constant pressure and k its thermal conductivity. The bidirectional coupling between Eq. 1 and Eq. 5 is made through the convective term $\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T$ and the Boussinesq approximation. Eq. 5 must be completed by boundary and initial conditions. At $t = 0$, the system was in thermal equilibrium with the exterior. Thus, the initial temperature T_0 , is given by the exterior temperature, $T_0 = T_{ext} = 21.3^\circ\text{C}$. The boundaries of the water injection holes are set to the temperature $T_i = 33.5^\circ\text{C}$ during the phase of injection and to thermal insulation during the other phases. All the other boundaries are set to a convective heat flux boundary condition. The convection coefficient, h , was set to the value $h = 11 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

In general, the process having three phases, the initial conditions for a given phase is the last state of the system in the previous one.

Modelling with Comsol Multiphysics

The geometry of the system has two plane symmetries. For the sake of simplicity, we didn't represent details such as screws, nuts, probe holders and the walls of the container. Thus, the simulation domain is the water with the immersed mock-up. A quarter of the system, shown by Figure 8, has been modelled. The height of the system is the initial water height in the container.

The Laminar Flow interface of the CFD Module and the Heat Transfer in Solids and Fluid interface of the Heat Transfer Module were used. The Nonisothermal Flow interface ensured the multiphysics coupling between the fluid flow and the heat transfer. The Boussinesq approximation was selected for that coupling.

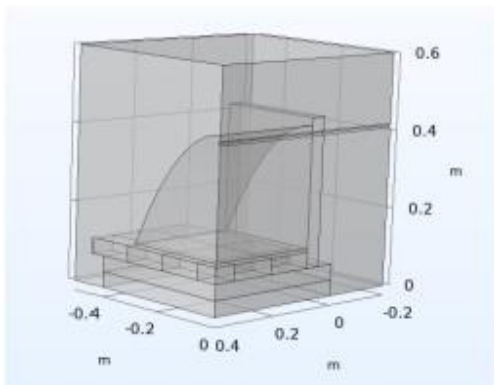


Figure 8. The geometrical representation in Comsol.

In order to complete the governing equations and the boundary conditions described in the previous section, two symmetry conditions were added at the symmetry planes locations as boundary conditions due to the geometrical representation.

The simulation was done with the default time dependent solver. The whole cycle consists in three studies corresponding to three phases summarized in Table 1.

Phase	Description	Time Range (min)
1	Water injection	[0;64]
2	Relaxation	[64;70]
3	Water extraction	[70;134]

Table 1: The three phases

During the phase 1, the water in the tank at ambient temperature is flushed by the injected water from the injection ramp. Then follows a period of relaxation, phase 2, where the water in the tank is cooled due to diffusion and convection. In the phase 3, the water is pumped out from the tank. The question to be answered is how much energy can be recovered from the amount that what was stored in the phase 1.

The volume of the water in the container is changing during the injection and pumping phases. The injected volume in the mock-up is about 140 liters, corresponding to an increase of the water height in the container about 12 cm. We assumed that this height change had a low impact on the temperature evolution inside the mock-up. Thus, in order to spare computation time, we didn't model the volume evolution of the container (by a deformed mesh or a diphasic air-water flow technique). We simply set an Outflow condition at the free surface boundary, activating the Back Flow Suppression during the phases 1 and 2 and disabling it during the phase 3. The Normal Flow option and the Compensation for Hydrostatic Pressure remained always activated at the open boundary. The mock-up hyperbolic boundary (Fig. 9), was defined as an Interior Wall. Its material properties were defined as a single layer material.

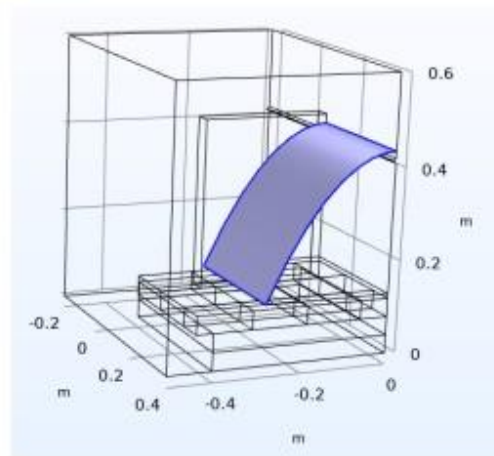


Figure 9. The mock-up hyperbolic boundary.

The boundaries of the injection ramp (Fig. 10) from where injection or pumping occurs were set the boundary conditions given by the Table 2 where the velocity of the injection is $v_0 = 0.3096 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The area of the surface of injection of a hole being equal

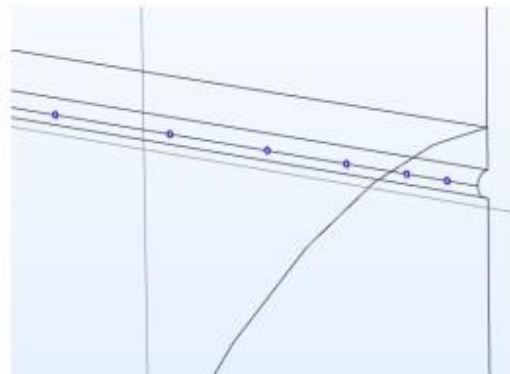


Figure 10. The water injection and pumping boundaries.

to $S = 4.9159 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$, the corresponding water debt per hole is $0.0913 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ which is about $2.19 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ for the total injection debt. The injection velocity was ramped in order to get numerical stability.

Phase	Laminar Flow	Heat Transfer
1	v_0 (ramped)	T_0
2	No Slip	Thermal Insulation
3	$-v_0$ (ramped)	Thermal Insulation

Table 2: Boundary conditions for injection boundaries at the different phases.

Simulation Results, Comparison with Experimental Measurements.

We used for comparisons between simulation and experimental measurements the temperature evolution at the location of the probes shown by Figure 11 during a full cycle: injection, relaxation, extraction.



Figure 11. Probes position for comparisons between simulation results and measurements.

The experimental results are shown by Figure 12.

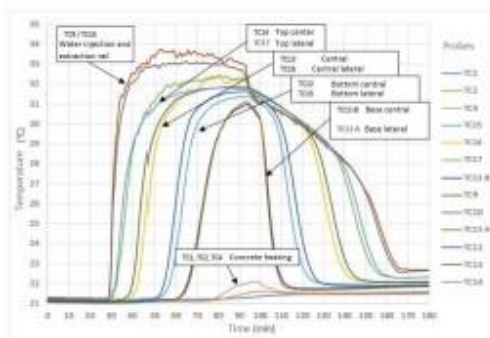


Figure 12. Temperature evolution measured by probes during a full cycle.

The probes were also placed in the Comsol model at the same locations. The temperature evolution obtained by simulation is shown by Figure 13.

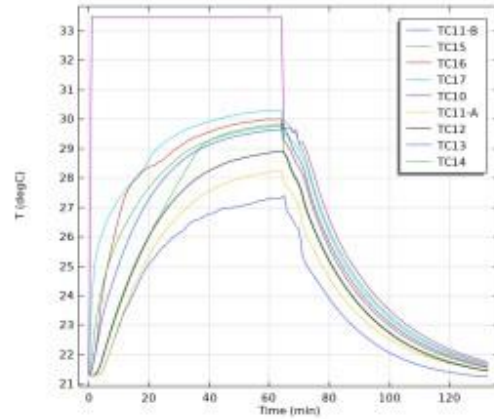


Figure 13. Temperature evolution obtained by simulation during a full cycle.

Figure 14 shows the temperature distribution at the end of water injection. We may notice that the tank is filled with warm water between approximately 27 °C and 33.5 °C.

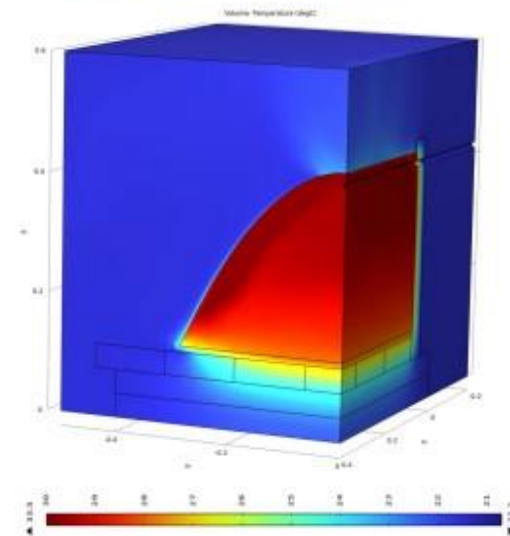


Figure 14. Temperature distribution at $t = 64 \text{ min}$ at the end of water injection. The range of temperature is from 21.1 °C (blue) to 33.5 °C (red).

Figure 15 shows the velocity distribution at the end of water injection. We may notice the existence of convection currents surrounding and on the top of the insulating shell.

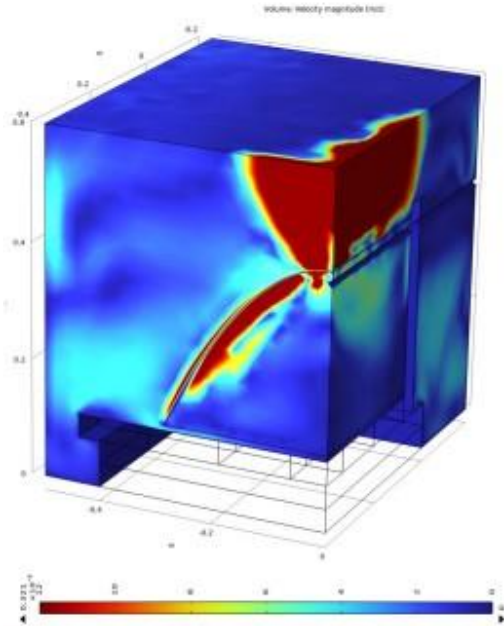


Figure 15. Velocity magnitude distribution at $t = 64$ min at the end of water injection showing the convection currents. The range of velocity magnitude is from $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (blue) on the walls to $0.321 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (red), at injection inlet.

Figure 16 shows the temperature distribution while extracting water. We may notice the gradient of the temperature distribution and the energy dissipation from the mock-up to the bottom of the system.

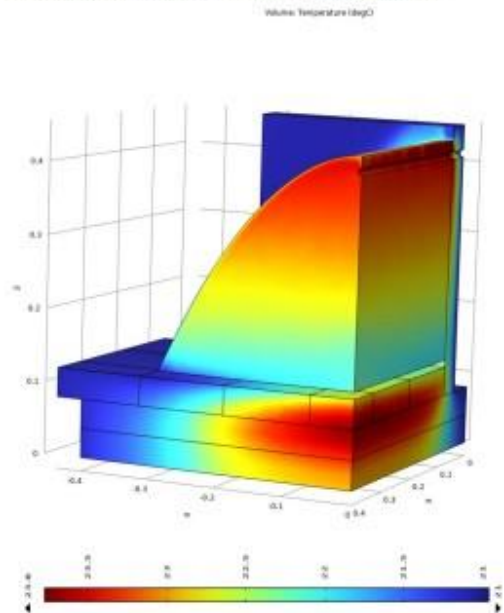


Figure 16. Temperature distribution at $t = 89$ min during water extraction. The range of temperature is from 21 °C (blue) to 23.8 °C (red).

Comparing the temperature response by simulation to the temperature response by experiments, we may notice the same global behavior and that the reached temperatures are coherent. The simulation curves look like the voltage curve response of a charge and discharge of an electric capacitor, except in the relaxation phase (6 min of duration) where the inflexion of the response curve is inverted. In the experimental curves this inverted inflexion lasts longer and we have a much more important response delay between the probes.

In order to explain the differences, we must bear in mind the simplification made in the geometry of our simulation model. For instance, the support of the probes has not been modeled. The probes are screwed on the support and probably there is a perturbation of the measures due to heat absorption by the support elements and the probes themselves. The probes also have an uncertainty of $\pm 1.5 \text{ °C}$ in the range of working temperatures according to the manufacturer's specifications. Their location, in the experiment versus in the simulation model, has also an uncertainty that was difficult to be quantified and that might be a sensitive factor. We may also notice that the injection temperature in the experiments is not homogeneous in the injection ramp, oscillating between 33 °C and 33.8 °C , whereas in the simulation model it's constant equal to 33.5 °C . Thus, the evolution of temperatures shown by the simulation is close to the reality even if we don't have exactly the same curve shapes. However, that point has still to be investigated.

The qualitative behavior of the system is pretty well reproduced by the simulation which helps to understand how the convection currents move away the thermal energy stored in the mock-up from its bottom open boundary, evacuating heat along its exterior boundaries to the container open boundary above the top of the container (Fig. 15). An amount of the thermal energy is also absorbed by diffusion in the concrete ground of the system. While pumping out the warm water, we may observe the gradient of temperature distribution, the colder water replacing the warmer water from the bottom to the top, where occurs pumping out.

Our target being the quantification of the recovered energy after storage [5], we analyzed in the postprocessing the energy balance during the cycle. The theoretical amount of internal energy, U_0 , stored in the tank of volume, V_{tank} , at $t = 0$ min is:

$$U_0 = \rho_w(T_0)V_{tank}C_p(T_0)(T_0 - T_{ref}). \quad (6)$$

The theoretical amount of internal energy, U_i , injected into the mock-up during 64 min is:

$$U_i = 24\rho_w(T_i)v_0S\Delta tC_p(T_i)(T_i - T_{ref}), \quad (7)$$

where S is the area of the surface of injection of each of the 24 injection holes and Δt is the duration of the injection in seconds. The injected water is assumed

to have a constant temperature. The internal energy of the tank at any time may also be calculated directly by Comsol Multiphysics: the internal energy of a domain at a given temperature distribution is the energy necessary to increase the temperature of the system from the reference temperature, T_{ref} , to that temperature distribution. Formula (7) may also be implemented in Comsol. If U_{64} is the internal energy at the end of injection, we expect to have the relation $U_{64} < U_0 + U_i$ because, during the injection, a part of the energy in the mock-up is lost through convection and diffusion. Thus, the stored energy, E_s , is given by the difference $E_s = U_{64} - U_0$. If U_{70} is the internal energy of the mock-up at the end of the relaxation phase, corresponding to time t_{70} , the stored energy available for extraction, E_a , is given by $E_a = U_{70} - U_0$. The energy loss, E_L , during relaxation is $E_L = U_{64} - U_{70}$. The internal energy of the extracted water, U_x , was computed with Comsol Multiphysics by using a probe giving the average surface temperature at the time t , \bar{T}_k , on the extraction surface of each of the 6 holes of the simulation model and time integration over the phase 3 ending at time t_{134} :

$$U_x = 4v_0 S \sum_{k=1}^6 U_k \quad (8)$$

where,

$$U_k = \int_{t_{70}}^{t_{134}} \rho_w(\bar{T}_k) C_p(\bar{T}_k) (\bar{T}_k - T_{ref}) dt \quad (9)$$

and where the factor 4 takes into account the two symmetries of the simulation model. The results are summarized in Table 3 where the energies are given in Mega Joules. The energy recovered by extraction is $E = U_x - U_0 = 1.9757 \text{ MJ}$ which represents about 82% of the amount of energy stored. The real energy balance must consider the energy used for pumping and the losses in the extraction tubes. Thus, the effective amount of energy available for usage would be less. However, the result shows the huge potential of the system to store energy. We also must bear in mind that the energy of the injected water is coming from the sun and is free of charge.

U_0	U_i	U_{64}	U_{70}
0.3861	7.8920	2.7891	2.4608
E_s	E_a	E_L	U_x
2.403	2.0747	0.3283	2.3618

Table 3: Energy balance results (MJ)

Conclusions

This work shows the ability to use multiphysics simulation with Comsol Multiphysics to understand the behavior of the ULISSE system. Provided that the simulation model represents with enough

accuracy the system, it would be possible to predict with a good approximation the energy balance. The model we did shows with a good agreement the evolution the system in the range of uncertainty and enhances the importance of the convection currents and diffusion in the energy loss. The consequence is the adaptation of the water extraction debt in order to minimize these losses.

The next steps of improvement of the multiphysics modelling would be to integrate in the model the fluid structure interaction. In a lake, the dynamics of water is more complex, producing underwater mechanical waves [6], [7]. The integration of that dynamics in the Comsol Multiphysics model should help to understand the resistance of the ULISSE structure to such waves. The project should be continued by the construction of a bigger mock-up in conditions closer to the real operation and allow to improve the numerical modelling.

References

- [1] *Proposal for the CORSAIRE energy project as part of a sustainable development effort*, W. van Sprollant, EPS 10 Trends in Physics, 10th General Conference of the European Physical Society, September 9-13, 1996, Sevilla (Spain)
- [2] *Utilisation thermique des eaux superficielles, Potentiel des lacs et rivières suisses* A. Gaudard; M. Schmid, Eawag; A. Wüest, Eawag et EPFL, AQUA & GAS N° 6. , 2018
- [3] *The cold store for a pumped thermal energy storage system*, T.R.Davenne et al. Journal of Energy Storage 14 (2017) 295-310
- [4] <https://www.comsol.com/model/free-convection-in-a-water-glass-195>
- [5] Benkhelifa, A. & Bouhdjar, Amor. (1998). Influence des forces d'inertie sur les performances de stockage thermique dans une cuve durant les phases de charge et de décharge. Revue des Études Renouvelables. 1.
- [6] Seasonality modulates wind-drive mixing pathways in a large lake, Beito Fernandez castro et al. Communications earth & environment (2012)2 :215
- [7] Vecsernyés, Zsolt. (1991). Horizontal mixing dynamics in the upper layer of lake Geneva. 10.5075/epfl-thesis-943.

Acknowledgements

The authors wish to kindly thank the Swiss Federal Office of Energy (OFEN, CH-Bern) for having supported this project.

