

Amélioration et modélisation en quasi-dynamique du procédé CHV3T.

À travers ce chapitre, les complications rencontrées sur le prototype lors des expérimentations menées par M. Martins sont passées en revues et des solutions sont proposées pour chacune d'elles. À partir de ces retours d'expérience, une nouvelle configuration de cylindre de transfert est proposée et une nouvelle variante du procédé CHV3T est développée, la variante CHV3T-WGS. Son fonctionnement sera décrit phase par phase afin d'en comprendre les subtilités et les différents avantages qu'elle apporte. Enfin une nouvelle étude quasi-statique permet ici de comparer ses performances à celles des variantes étudiées dans le chapitre précédent.

Dans un second temps, une simulation quasi-dynamique a été réalisée afin de compléter les résultats obtenus à partir des modélisations quasi-statiques préalablement réalisées. Celle-ci permet notamment de mesurer l'impact des évolutions de température des sources et puits de chaleur à l'échelle d'une journée, notamment sur les niveaux de liquide au sein des différents composants. Ces simulations permettront également de mettre en place des stratégies de contrôle-commande des vannes, notamment un processus d'initialisation, pour le démarrage du procédé, mais aussi de tester ces stratégies afin d'empêcher d'éventuels blocages.

1. Introduction : Évolution du procédé thermo-hydraulique CHV3T

À partir des travaux antérieurs de Martins et des versions étudiées précédemment, une nouvelle variante du procédé thermo-hydraulique CHV3T a été développée. Cette variante fait l'objet d'une déclaration d'invention pour une possible demande de brevet ultérieure par la SATT. Cette variante est décrite de manière plus détaillée dans ce chapitre étant donné qu'elle sera la variante la plus étudiée au cours des chapitres suivants. Cette variante, dite "CHV3T-WGS" (S pour symétrique) est une évolution de la variante WG ; elle comporte différentes modifications du procédé et de ses composants permettant des améliorations dans sa gestion. Avant de décrire ces améliorations, il est important de bien comprendre les raisons qui ont conduit à faire évoluer le procédé thermo-hydraulique CHV3T.

1.1. Verrous technologiques et solutions proposées

Les retours d'expériences suite à la conception d'un premier prototype durant la thèse de Martins [53], permettent de repenser la conception du procédé thermo-hydraulique CHV3T. À travers cette partie, les principaux verrous technologiques qui ont été alors rencontrés sont analysés afin de cerner leurs causes et leurs conséquences. Dans un deuxième temps des solutions seront proposées et détaillées pour pallier chacun de ces problèmes et garantir un fonctionnement correct du procédé.

1.1.1. Émulsion du liquide de transfert et coup de pression

Un des problèmes rencontrés porte sur l'émulsion des fluides de travail avec le liquide de transfert provoquée lors des phases de dépressurisation des cylindres de transfert. Malgré la

faible miscibilité théorique des fluides de travail et de transfert (une huile minérale), le brusque dégazage, observé lors de ces dépressurisations, d'une faible quantité de fluide de travail dissoute dans le liquide de transfert a engendré une émulsion de ces deux fluides à leur interface. La première conséquence de cette émulsion est que de l'huile a été entraînée en dehors des cylindres de transfert où elle devait être confinée. Cette huile s'est accumulée au sein des échangeurs de chaleur limitant l'échange thermique entre le fluide de travail et l'extérieur et pénalisant de fait grandement les performances du procédé. On peut distinguer deux causes distinctes à ce phénomène, d'une part l'absence de séparation physique entre ces deux fluides, d'autre part, les variations brusques de pression engendrées par chaque ouverture et fermeture de vannes mettant en communication les évaporateurs ou condenseurs avec les cylindres de transfert.

Pour pallier ce problème, deux solutions sont proposées, chacune répondant aux causes décrites précédemment. Premièrement il a été décidé d'intégrer une séparation physique entre les deux fluides et la solution technologique la plus pertinente est que ce soit par une membrane. Deuxièmement, il est primordial d'empêcher ou de limiter les coups de pression ; ceux-ci seraient susceptibles d'endommager la membrane ou d'en réduire la durée de vie. Deux solutions sont envisagées pour pallier ce problème :

- Utiliser une technologie de vanne qui permette une ouverture plus progressive de celle-ci en générant une perte de charge à l'ouverture. Cette solution permettrait principalement d'éviter les brusques variations de pression pendant les changements de phases du cycle, notamment lors de la mise en communication des bouteilles séparatrices avec le cylindre de transfert pour effectuer la récupération interne d'énergie, ou à mise en communication avec les évaporateurs préalablement isolés.
- Mise en place d'un capillaire entre les cylindres de transfert CT_R et CT_M ainsi que CT'_R et CT'_M . Ces capillaires accompagnés d'une vanne permettraient de rééquilibrer progressivement les pressions entre les cylindres de transfert avant leur mise en communication plus directe par une voie parallèle.

1.1.2. Gestion des condensats

L'apparition de condensats au sein des cylindres de transfert constitue un autre problème potentiel. Dans la variante du procédé CHV3T du prototype développé par M. Martins, les cylindres de transfert étaient maintenus à la température T_h par une fraction de la chaleur produite par les capteurs solaires utilisée pour le chauffage de l'évaporateur moteur.

Cette solution avait cependant deux inconvénients :

- elle retardait la mise en fonctionnement établie du procédé. En effet au matin la chaleur produite doit d'abord servir à mettre en température les cylindres de transfert avec leur inertie thermique non négligeable avant de pouvoir alimenter convenablement l'évaporateur moteur.
- en outre, maintenir en permanence les cylindres de transfert à T_h revient à pénaliser le rendement du cycle. En effet, pendant certaines phases, les vapeurs contenues dans les cylindres de transfert doivent être condensées. Ainsi maintenir les cylindres à T_h puis condenser à T_{mR} ou T_{mM} les vapeurs qu'ils contenaient permet certes d'éliminer la

formation de condensats dans les cylindres, mais pénalise l'efficacité des condenseurs et donc du procédé.

En conséquence une nouvelle approche a été proposée. Nous avons privilégié la récupération des condensats dans les cylindres plutôt que de chercher à empêcher leur formation. Dans ce but la géométrie des cylindres de transfert a été complètement redéfinie. Tout d'abord ceux-ci ont été "retournés", le liquide de transfert initialement en bas, se retrouve dans la partie haute afin que les possibles condensats du fluide de travail puissent s'écouler par gravité dans le condenseur. Ce retournement n'est évidemment possible qu'en présence d'une membrane retenant en haut le liquide de transfert. La géométrie des cylindres de transfert a été étudiée pour faciliter le drainage des condensats et par ailleurs c'est toute la disposition spatiale des autres composants qui a été redéfinie pour faciliter l'écoulement gravitaire des condensats.

Enfin des pièces spécifiques ont été confectionnées pour limiter autant que possible le volume mort dans les cylindres de transfert, qui comme l'a précédemment montré M. Martins nuit à l'efficacité du procédé (voir § 1.2 suivant).

1.1.3. Pressurisation du fluide de travail moteur

Pendant tous les essais réalisés par Martins, la pompe P_M n'a jamais atteint les débits prévus par le constructeur et présentait des signes de cavitation. Il apparaît aujourd'hui que l'enchaînement des phases tel qu'il était prévu ne pouvait permettre la pressurisation du fluide à l'aide de la pompe retenue, parmi les très peu nombreuses pompes alors disponibles. Comme on peut le voir sur la Figure III-1 le but de la pompe P_M est d'aspirer et pressuriser le liquide présent dans la bouteille BS_M , à l'état saturé à son interface, pour l'introduire à P_h dans l'évaporateur E_M .

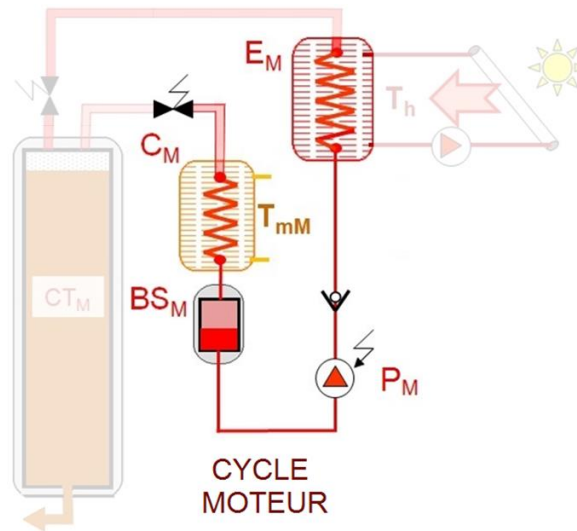


Figure III-1 : Schéma simplifié de la partie motrice du CHV3T-W0

Le dimensionnement d'une pompe nécessite le calcul du NPSH (Net Positive Suction Head) disponible. La valeur NPSH caractérise la différence entre la pression du liquide à l'aspiration de la pompe et sa pression de vapeur saturante. Chaque pompe a un NPSH minimal requis en fonction de sa technologie et d'autres critères géométriques. Concrètement, la mise en route de la pompe entraîne une dépressurisation locale à l'aspiration de celle-ci qui peut induire un phénomène de cavitation au niveau du rotor de la pompe. Pour éviter ce phénomène, soit la

pompe doit être placée à une position beaucoup plus basse que la réserve de liquide, soit le liquide doit être davantage sous-refroidi.

Une solution alternative proposée dans ce mémoire est le remplacement de la pompe P_M par un système de pressurisation thermique. Le fluide de travail à l'état de liquide saturé à pression intermédiaire P_m contenu dans la bouteille BS_M est introduit par gravité dans l'évaporateur E_M . Celui-ci étant alimenté par la boucle chaude à la température T_h , l'ensemble (BS_M ; E_M) va monter en pression jusqu'à P_h . Cette pressurisation dite "thermique" permet en outre de réduire la consommation électrique du procédé et donc d'augmenter son COP_{elec} . Ce concept de pressurisation thermique sera plus amplement détaillé ultérieurement.

1.1.4. *Mesure du niveau de liquide de transfert*

La mesure du niveau de liquide dans les cylindres de transfert n'est pas obligatoire pour le procédé CHV3T qui ne requiert qu'une bonne connaissance des niveaux haut et bas. Néanmoins, pour l'application de trigénération qui inclut l'utilisation du procédé CAPILI (détaillé dans le chapitre IV) une connaissance plus précise de ce niveau s'avère nécessaire. Les capteurs à flotteur initialement utilisés par M.Martins doivent être remplacés par un capteur de niveau continu, en l'occurrence de type magnétostrictif. Afin de pouvoir suivre le mouvement de la membrane, celle-ci est équipée d'une assiette en son centre sur laquelle est fixé un tube de guidage. Un aimant circulaire est placé à l'extrémité de ce tube afin que le capteur magnétostrictif puisse suivre le déplacement de la membrane au cours du temps. Ce guidage de déplacement a pour autre effet d'augmenter la durée de vie de la membrane.

1.1.5. *Réduction des irréversibilités*

Le fonctionnement intermittent du procédé CHV3T, découpé en phases distinctes, implique l'isolement (massique) des évaporateurs et condenseurs durant certaines phases. Cet isolement est préjudiciable aux performances du procédé. En effet avec des apports solaires constants, l'isolement de l'évaporateur moteur implique inévitablement une montée en température du fluide de travail dans ce composant, suivie d'une brusque baisse lorsqu'il est à nouveau connecté sur un cylindre de transfert. Ces fluctuations de la température haute T_h , et donc de la pression P_h entraînent des irréversibilités thermodynamiques qui affectent les performances du procédé. Ce problème peut éventuellement être réglé avec l'ajout d'un système de stockage. Il peut également être réduit en diminuant le nombre de phases du cycle. Ainsi, l'ajout de deux bouteilles séparatrices sur la variante WG du CHV3T permet d'effectuer simultanément les phases de transfert de travail à haute et basse pressions. Cette amélioration permet de passer d'un fonctionnement en 4 phases distinctes à seulement 3, réduisant de ce fait le temps d'isolement de certains composants et les irréversibilités thermodynamiques qui en résultent.

1.2. Les cylindres de transferts

À travers les solutions proposées précédemment, on constate que le cylindre de transfert nécessite d'être complètement redéfini afin de pallier un certain nombre de problèmes technologiques sans que cela n'altère son rôle principal de "piston hydraulique" nécessaire au transfert de travail de la partie motrice vers la partie réceptrice. Ces réflexions nous ont permis d'élaborer un nouveau cahier des charges qui, avec l'aide d'industriels tel que EFFBE (Habsheim)

pour la conception des membranes et SAMM (Saint Sorlin en Valloire) pour l'aspect chaudronnerie, et avec l'aide de l'ingénieur SATT mis à disposition du projet, nous a permis de concevoir des cylindres de transfert répondant à toutes ces contraintes.

La membrane développée en collaboration avec la société EFFBE est composée d'une matrice en tissu, enrobée de part et d'autre d'un élastomère spécialement choisi pour sa compatibilité avec les fluides de travail envisagés. Avec une épaisseur totale de 0,5mm, cette membrane est à la fois souple et résistante de manière à pouvoir se déformer sans effort.

Cette membrane est pincée sur sa circonférence entre les deux moitiés du corps de cylindre. Deux bossages successifs présents sur tout le contour de la moitié inférieure du corps de cylindre permettent de créer une contrainte locale sur la membrane et assure l'étanchéité avec l'extérieur (figure III-2). Au centre de la membrane, un trou permet l'intégration de l'assiette sur laquelle est vissé le tube de guidage. En position haute et basse, l'assiette est reçue par des obturateurs inférieur et supérieur.

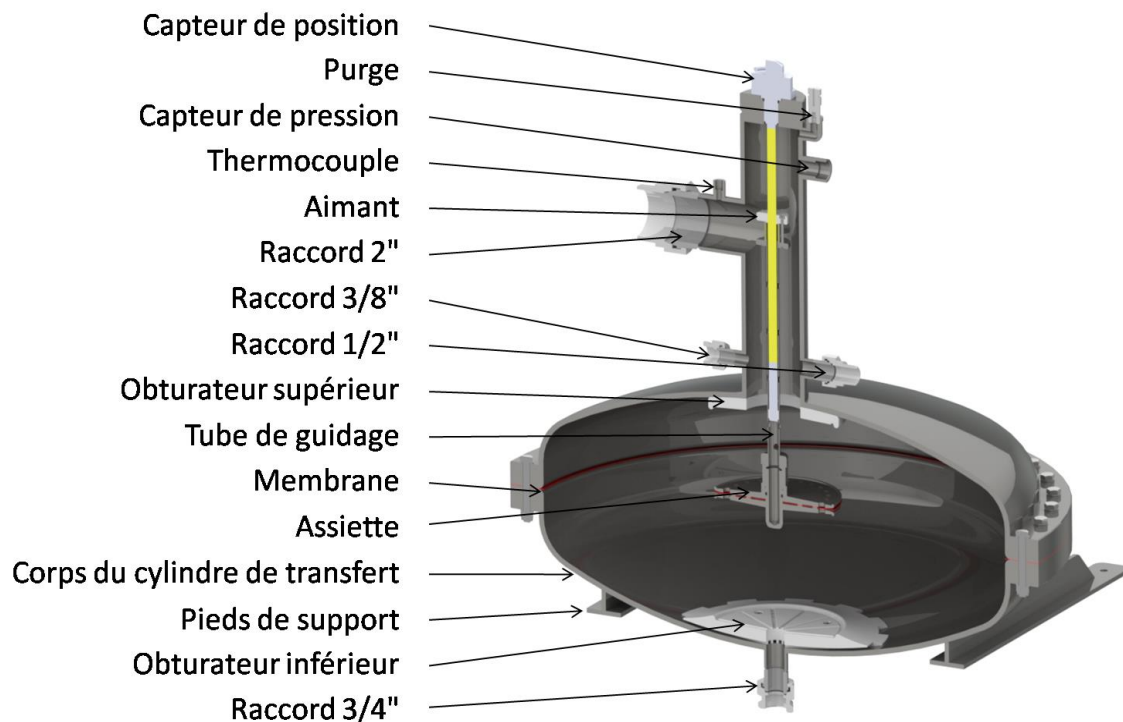


Figure III-2 : Représentation du cylindre de transfert et détails de sa composition

Ces obturateurs ont plusieurs fonctions : guider le tube de guidage en fin de course, orienter parfaitement l'assiette et limiter les volumes morts côté gaz en épousant presque parfaitement la forme de la membrane. L'obturateur inférieur est également conçu pour permettre l'écoulement des condensats, mais cela induit un léger volume mort. Afin de mesurer le déplacement de la membrane, le tube de guidage est équipé d'un aimant, le tout coulissant autour d'un capteur magnétostrictif qui mesure le déplacement de l'aimant avec une précision d'un demi-millimètre.

S'ajoute à cela l'instrumentation nécessaire au suivi et au contrôle du fonctionnement du procédé, thermocouple sur le liquide de transfert et mesure de pression. Pour plus d'informations sur les cylindres de transfert, se reporter aux annexes correspondantes (Annexe 1).

1.3. Nouvelle variante CHV3T-WGS

Une nouvelle variante du procédé CHV3T a été étudiée pour répondre aux différents problèmes listés au paragraphe III.1.1 que sont, la récupération des condensats, la pressurisation du fluide de travail moteur et l'amélioration des performances. Les performances de cette variante seront ensuite calculées et comparées aux précédentes.

1.3.1. Composants et architecture de la variante CHV3T-WGS

La variante WGS est une évolution de la variante WG, le "S" désignant l'aspect symétrique de cette évolution. La nouvelle architecture de la variante CHV3T-WGS est présentée dans la Figure III-3.

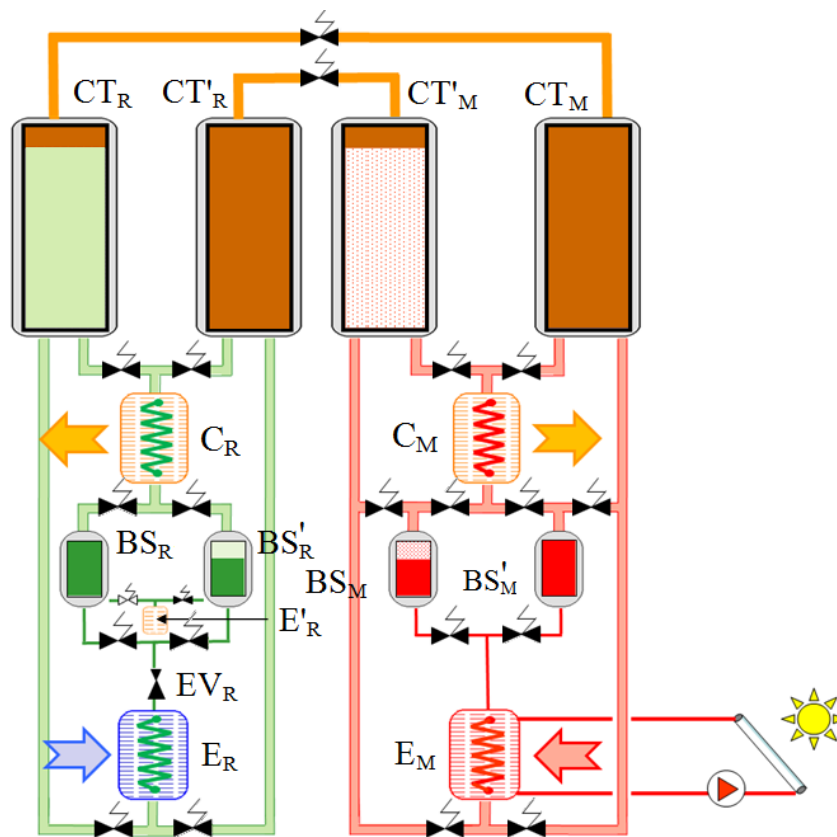


Figure III-3 : Schéma simplifié présentant les composants constituant la variante WGS du CHV3T

On constate plusieurs différences avec la variante WG qui sont listées ci-dessous.

- Le circuit hydraulique est désormais situé dans la partie supérieure, a contrario des versions précédentes. Cette nouvelle disposition est rendue possible par la mise en œuvre d'une membrane mobile, au sein des cylindres de transfert. Du fait du fonctionnement par paire des cylindres de transfert, la pression hydrostatique exercée sur la membrane est relativement faible, le poids de chaque colonne d'eau étant compensé par celui présent dans le cylindre opposé. Cette nouvelle configuration permet de déplacer tous les autres composants des circuits récepteur et moteur, et notamment les évapo-condenseurs, sous les 4 cylindres de transfert, ce qui facilite l'évacuation des condensats par écoulement gravitaire.

- Les deux bouteilles séparatrices placées en série sur la variante WG (BS_R , BS'_R coté récepteur et BS_M , BS'_M coté moteur) sont maintenant placées en parallèle, permettant ainsi de simplifier la commande du cycle en passant de 4 phases par demi-cycle à 3 phases, les phases de transfert de travail à P_b et P_h se faisant simultanément. Cela réduit le temps d'isolement des évaporateurs et condenseur et réduit ainsi les irréversibilités thermodynamiques occasionnées. Toutefois l'étude quasi-statique ne permet pas de déterminer quantitativement cette réduction.
- Un évaporateur auxiliaire appelé (E_R) est ajouté sur le cycle récepteur. Ce dernier aura plusieurs rôles. Sur le principe de vase à débordement celui-ci est placé en aval des bouteilles BS_R et BS'_R , ainsi, les condensats issus de C_R rempliront en priorité l'évaporateur E_R avant de remplir la bouteille séparatrice BS_R ou BS'_R . Le volume de cet échangeur est dimensionné pour recevoir la quantité de fluide de travail nécessaire à la pressurisation des CT à P_h . Il n'est donc pas nécessaire de connaître le niveau de fluide au sein des bouteilles séparatrices, ce qui peut s'avérer compliqué avec un fluide en ébullition. Second avantage, la surface d'échange importante de l'évaporateur E_R en contact permanent avec la phase liquide du fluide de travail permet une remise en pression plus rapide du cylindre de transfert CT_R ou CT'_R . Enfin, cet échangeur peut être isolé des bouteilles séparatrices, ce qui permet de maintenir le fluide de travail à P_h en attendant la phase de pressurisation du CT.
- Dernière innovation (optionnelle), le remplacement de la pompe P_M par un système de pressurisation thermique. Un conduit relie directement CT'_M à BS_M et CT_M à BS'_M tel que présenté sur la Figure III-4.

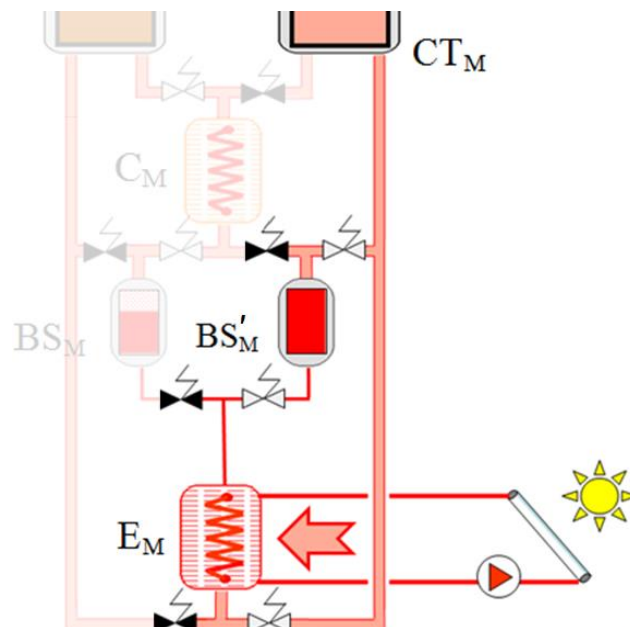


Figure III-4 : Schéma simplifié de la partie moteur du CHV3T-WGS présentant le principe de la pressurisation thermique du fluide de travail

Ainsi pendant la phase de mise en pression du cylindre de transfert, l'ensemble CT_M , BS'_M et E_M sont mis en contact. Le liquide présent dans la bouteille BS'_M s'écoule par gravité dans

l'évaporateur E_M . L'évaporateur E_M , en contact avec la source chaude va évaporer le liquide pour remonter l'ensemble à la pression P_h et pousser le liquide de transfert de CT_M à CT_R sans consommation électrique. Le principe de pressurisation thermique est rendu possible par le fonctionnement intermittent du procédé CHV3T. Cette solution peut permettre de pallier le problème de cavitation de la pompe P_M et permet également d'améliorer les COP_{elec} et COA_{elec} de l'installation, l'énergie nécessaire à la pressurisation provenant alors de la chaleur produite par les capteurs solaires.

1.3.2. Description des phases de la variante CHV3T-WGS

Les changements structurels du procédé CHV3T-WGS ont logiquement entraîné une modification des différentes phases du procédé nécessaire au fonctionnement périodique de celui-ci. Dans la variante WGS, un cycle complet nécessite 6 phases distinctes, deux phases de transfert de travail, deux phases de récupération d'énergie interne et deux phases de régénération. Chaque cycle est constitué de 2 demi-cycles durant lesquels les transformations suivies par les fluides de travail sont identiques, mais où les rôles des cylindres de transfert et des bouteilles séparatrices dans leurs paires respectives sont inversés. Les trois premières phases $\alpha\beta$, $\beta\gamma$ et $\gamma\alpha'$ d'un de ces demi-cycles sont détaillées ici :

Phase $\alpha\beta$: La phase $\alpha\beta$ ou phase de transfert de travail, est la phase où s'effectuent les deux transferts de travail entre les cycles moteur et récepteur pour produire le chaud ou le froid. À partir de l'état initial présenté dans la Figure III-3, plusieurs transformations thermodynamiques visibles sur la Figure III-5 ont lieu simultanément.

Coté moteur : Les composants CT_M , BS'_M et E_M sont mis en contact pour assurer la pressurisation thermique. Le fluide wf_M à pression P_j (suite à la récupération d'énergie interne du cycle précédent) va monter en pression jusqu'à atteindre la pression de saturation P_h correspondant à la température haute délivrée par les capteurs solaires. Cette pression P_h va alors permettre le transfert de travail du cylindre moteur CT_M vers le cylindre récepteur CT_R en déplaçant le liquide de transfert de l'un vers l'autre ; c'est la transformation ($a_j \rightarrow b \rightarrow c$) et permettre la transformation ($2 \rightarrow 3$) du cycle récepteur.

Dans le même temps, la condensation des vapeurs à basse pression issues de CT'_M dans C_M entraîne le déplacement du liquide de transfert du coté récepteur (CT'_R) vers le coté moteur (CT'_M). Ces vapeurs sont condensées et s'écoule dans la bouteille séparatrice BS_M pour y être stockées à basse pression ; c'est la transformation ($d \rightarrow a$). Pendant cette étape de la chaleur à la température T_{mM} peut être récupérée pour le chauffage, tandis qu'en mode climatisation elle est rejetée à l'extérieur de l'habitat.

Coté récepteur : Le travail fourni par le cycle moteur par l'intermédiaire du liquide de transfert va chasser les vapeurs haute pression présentes dans le cylindre CT_R vers le condenseur C_R où elles sont condensées pour remplir d'abord l'évaporateur auxiliaire E'_R puis stocker l'excédent dans la bouteille séparatrice BS_R à haute pression P_h . Cette étape correspond à la transformation ($2 \rightarrow 3$). Pendant cette étape, comme pour le coté moteur, de la chaleur à la température T_{mR} peut être récupérée pour le chauffage ou rejetée vers l'extérieur en mode climatisation.

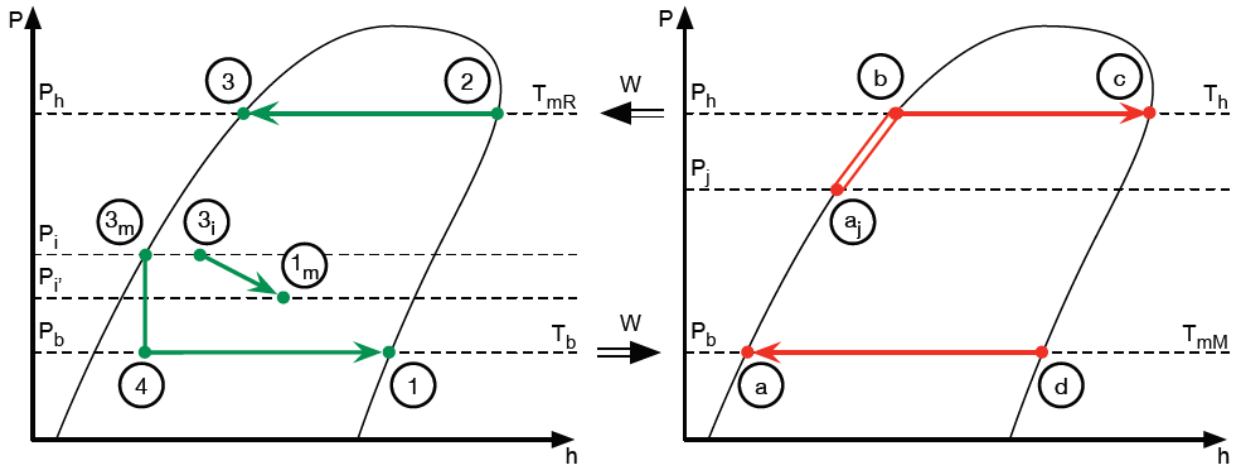


Figure III-5 : Transformation thermodynamique au sein des cycles récepteur (à gauche) et moteur (à droite) pendant la phase de transfert appelée $\alpha\beta$ (le double trait rouge signifie que cette transformation a lieu dans plusieurs composants)

Dans le même temps, le déplacement du liquide de transfert de CT'_R vers CT'_M entraîne une expansion du gaz dans l'évaporateur principal E_R . Le liquide contenu dans la bouteille BS'_R à la pression P_i est alors détendu isenthalpiquement au travers de la vanne EV_R pour être évaporé à basse pression P_b dans l'évaporateur E_R . C'est durant cette étape que des calories sont captées dans l'habitat en mode climatisation, ou à l'extérieur du bâtiment en mode chauffage. À la fin de cette étape, le cylindre de transfert CT'_R est alors rempli de vapeurs à basse pression. Cette transformation correspond aux transformations $(3_m \rightarrow 4 \rightarrow 1)$. La bouteille séparatrice BS'_R se retrouve à une pression intermédiaire entre P_i et P_b appelée P_i' . En effet dans cette bouteille une partie du liquide qu'elle contenait s'est vaporisée (induisant une chute de température interne) puisque le volume occupé par la phase gazeuse y est plus important à l'issue de cette transformation (représentée $3_i \rightarrow 1_m$ dans la figure III-5).

Pour récapituler : durant cette phase $\alpha\beta$ le cycle moteur capte de la chaleur à T_h , produit du travail et évacue de la chaleur à une température inférieure T_{mM} . Le travail produit est consommé par le cycle récepteur via les cylindres de transfert pour réaliser un pompage de chaleur par compression hydraulique de vapeur, entre une source froide à T_b et un puits chaud à T_{mR} . Une fois cette étape terminée, le procédé n'est pas capable de recommencer celui-ci immédiatement. Deux étapes intermédiaires de pressurisation et dépressurisation des cylindres, décrites ci-dessous, sont alors nécessaires.

Phase $\beta\gamma$: La phase de récupération d'énergie interne qui était perdue dans la variante W_0 , est représentée dans la Figure III-6.

Coté moteur : Elle consiste à mettre en contact l'ensemble $(CT'_M ; BS'_M)$ à haute pression P_h avec la bouteille séparatrice BS'_M contenant du liquide et un ciel gazeux à basse pression P_b . Lors de cette phase, les pressions s'équilibrent à une valeur intermédiaire P_j . Les transformations suivies dans ces composants sont respectivement $c \rightarrow c_j$ et $a_m \rightarrow a_j$. Ainsi pendant la phase suivante de transfert de travail, le différentiel de pressurisation du cylindre de transfert sera moins important (par rapport à la variante W_0) ce qui améliore significativement les performances.

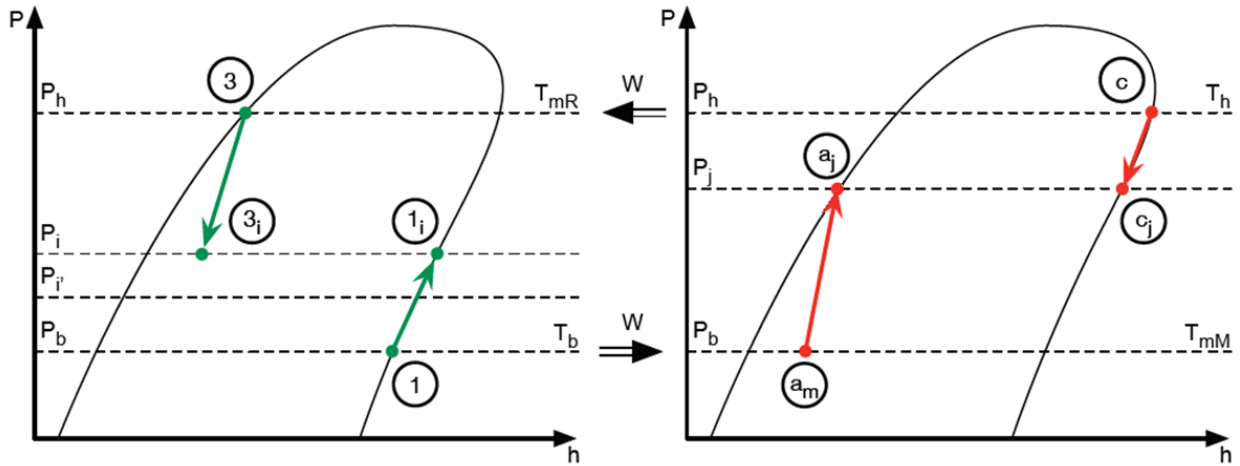


Figure III-6 : Transformations thermodynamiques au sein des cycles récepteur et moteur pendant la phase de récupération d'énergie interne appelée β

Coté Récepteur : Le cylindre à basse pression CT'_R est mis en communication avec la bouteille séparatrice pleine de liquide à haute pression BS_R . Il en résulte une pression intermédiaire P_i dans ces composants qui réduira d'autant l'énergie à apporter pour pressuriser le cylindre de transfert CT'_R jusqu'à P_h . Autre avantage, cela abaisse la pression dans la bouteille BS_R et donc améliore significativement le COP_{th} du procédé par rapport à la variante $W0$. En effet le liquide qui traverse le détendeur EV_R se retrouve à l'état 3_m (Figure III-5), au lieu du point 3 sur la variante $W0$. La différence d'enthalpie entre ces deux points implique une production de froid plus importante.

Phase $\gamma\alpha'$: La dernière phase $\gamma\alpha'$ du demi-cycle, appelée aussi phase de régénération va permettre de "réinitialiser" les pressions au sein des cylindres de transfert afin que ceux-ci soient prêts pour la prochaine phase de transfert de travail (Figure III-7).

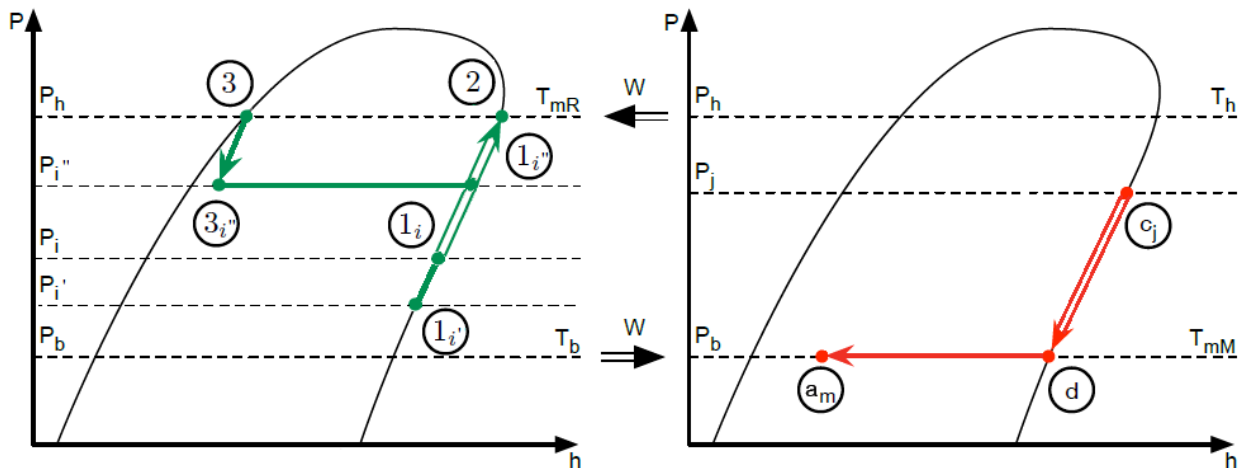


Figure III-7 : Transformations thermodynamiques au sein des cycles récepteur et moteur pendant la phase $\gamma\alpha'$ (les doubles traits signifient que ces transformations ont lieu dans plusieurs composants)

Coté récepteur : Le cylindre CT'_R à la pression P_i , la bouteille séparatrice BS'_R à la pression P_i et l'évaporateur auxiliaire E'_R à la pression P_h sont tous mis en contact. Il en résulte dans un premier temps une pression $P_{i''}$ intermédiaire, mais l'évaporateur auxiliaire connecté à la source chaude va remonter cet ensemble jusqu'à la pression P_h par évaporation du liquide qu'il contient

de manière à ce que le cylindre de transfert CT'_R soit prêt pour la prochaine phase de transfert de travail.

À la fin de cette étape, on retrouve les conditions initiales du début de la phase $\alpha\beta$ présentées dans la Figure III-4 pour les fluides de travail. Pour le second demi-cycle les rôles des composants CT_R , CT'_M , BS_R , BS'_M d'une part et CT'_R , CT_M , BS'_R , BS_M d'autre part sont respectivement intervertis. Les phases $\alpha'\beta'$, $\beta'\gamma'$, $\gamma'\alpha$ nécessaires pour finir le cycle complet seront donc les mêmes que celles décrites ci-dessus.

Après avoir décrit les différentes innovations de cette variante WGS et ses phases de fonctionnement, il convient d'en évaluer les performances.

1.3.3. Pré-dimensionnement des différents composants

Par symétrie des 2 demi-cycles les volumes des composants fonctionnant par paire (CT_R et CT'_R , BS_R et BS'_R , etc.) sont nécessairement égaux dans la paire considérée. En outre les volumes des cylindres de transfert CT_R et CT'_M sont également identiques puisqu'occupés alternativement par le même volume de liquide de transfert.

Le code de calcul statique permet de déterminer l'enchaînement des 6 phases en fonctionnement nominal du CHV3T-WGS autour d'un point de fonctionnement (T_b , T_{mR}) sans variations de température. La modélisation cyclique des différentes phases conduit à deux systèmes d'équations non linéaires à 4 inconnues (un pour le cycle moteur, un pour le cycle récepteur). La résolution de ces systèmes conduit à établir un rapport optimal entre le volume des cylindres de transfert, CT_R et CT'_M , et le volume des bouteilles séparatrices, BS_R et BS'_M respectivement, de manière à optimiser la récupération d'énergie interne pendant la phase dédiée. On peut déterminer aussi le rapport optimal entre le volume des cylindres de transfert CT_R et le volume de l'évaporateur auxiliaire E'_R pour s'assurer que la quantité de fluide à l'intérieur de ce dernier soit suffisante pour remplir de vapeurs à haute pression les cylindres de transfert CT_R ou CT'_R .

Le couple fluide R1234yf/R1233zd(E) a été retenu comme l'un des plus intéressants par rapport à ses performances thermodynamiques et surtout à sa relative neutralité sur le plan environnemental. Pour un volume du cylindre de transfert de 40 L et en considérant les mêmes plages d'utilisation que celles détaillées dans la section II.2.3.2, c'est à dire [-10 °C ; 40 °C], les résultats de la procédure de dimensionnement quasi-statique sont présentés dans le Tableau III.1.

Tableau III.1 : Quantité de fluide et volumes des bouteilles séparatrices nécessaires au bon fonctionnement du procédé CHV3T-WGS sur la plage de température [-10 °C ; 40 °C]

Masse de fluide récepteur (R1234yf)	4,56 kg
Volume des bouteilles séparatrices BS_R et BS'_R	1,95 L
Volume du générateur de vapeur auxiliaire E'_R	1,45 L
Masse de fluide moteur (R1233zd)	5,04 kg
Volume des bouteilles séparatrices BS_M et BS'_M	2,54 L
Volume d'un cylindre de transfert	40 L

Ces valeurs extensives seront à ajuster en fonction du volume finalement retenu des cylindres de transfert.

1.3.4. Performances de la variante CHV3T-WGS

Au niveau du cycle thermodynamique, les différences entre la variante WG et WGS sont minimales, les équations de calcul du COP_{th} et du COA_{th} (52) et (53) utilisées pour la variante WG restent valables. Les enthalpies des points h_{3il} et h_{aj} peuvent présenter des différences minimales dues à l'utilisation différente des bouteilles séparatrices placées en parallèle.

Afin d'évaluer les performances de la variante WGS du procédé CHV3T, l'algorithme utilisé dans la section II.2.3.2 a été adapté à cette nouvelle variante. Cet algorithme permet de sélectionner et de comparer les couples fluides qui permettent le fonctionnement du procédé sur une plage de température [-10 °C, 40 °C] (Figure III-8).

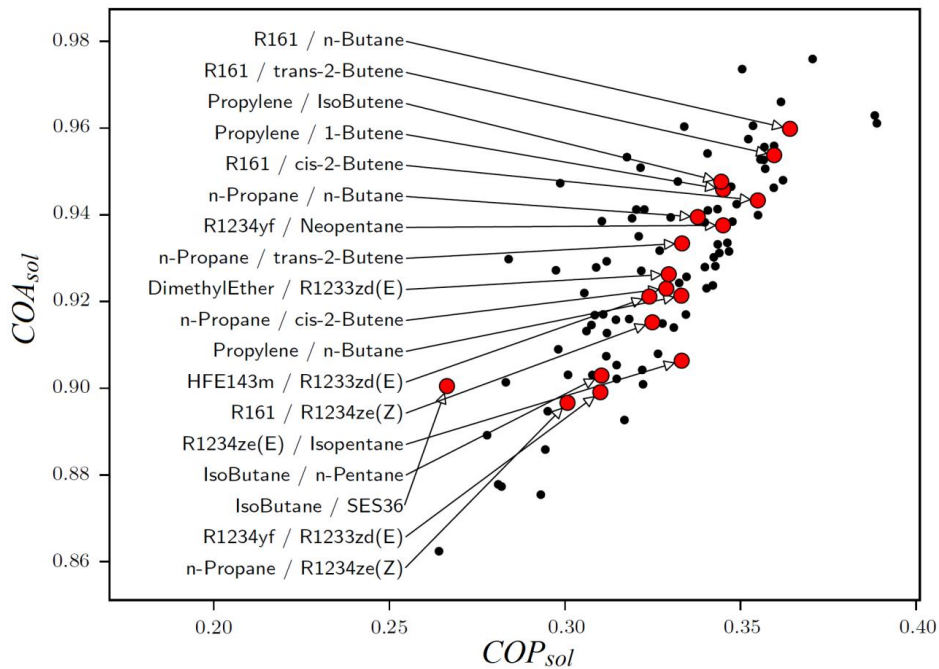


Figure III-8 : Ensemble de Pareto du procédé CHV3T-WGS avec les couples de fluides garantissant le fonctionnement du procédé sur une plage de température [-10°C ;40 °C]. Pour faciliter la comparaison avec les autres variantes, les performances sont données pour $T_b = 12 \text{ °C}$ et $T_{mR} = 35 \text{ °C}$.

Comme attendu, l'ordre de sélection des couples fluides reste inchangé et les performances sont quasi confondues avec celles obtenues par la variante WG. Toutefois les évolutions apportées à la variante WGS restent nécessaires. Leur intérêt pour une plus grande facilité de gestion sera montré par la modélisation dite "quasi dynamique" du procédé développé en 2ème partie de ce chapitre.

2. Modélisation en quasi-dynamique du procédé CHV3T-WGS

La modélisation quasi dynamique développée ici a pour but de venir compléter et affiner les évaluations de performances obtenues via la modélisation quasi-statique en éliminant l'hypothèse des températures des sources et puits de chaleur fixes tout au long de l'année. S'il peut être acceptable de considérer que les températures internes de l'habitat restent constantes (une pour l'été, une autre pour l'hiver) et à la rigueur aussi pour celle de la source de chaleur solaire (T_h) grâce à des régulations, cela n'est plus du tout réaliste pour la température de la source ou puits de chaleur externe liée aux conditions météorologiques. Or ces fluctuations

journalières ou saisonnières ont des influences en cascade sur les températures internes et les pressions des fluides de travail ainsi que sur les niveaux de liquide au sein des bouteilles séparatrices.

L'étude quasi dynamique a été préférée à une étude complètement dynamique, car elle semble être un meilleur compromis temps d'investissement/résultats. Une étude strictement dynamique serait nettement plus complexe à mettre en œuvre, car particulièrement sensible aux variations brusques telles que ce que l'on rencontre à chaque ouverture/fermeture de vannes (le système étudié comportant pas moins de 26 vannes).

La modélisation quasi dynamique, plus stable, permet néanmoins de lever certaines interrogations encore en suspens portant sur le temps des différentes phases, l'évolution des niveaux de liquide dans les différents composants, ou les actions correctrices nécessaires en cas de dérive du système.

Celle-ci garde néanmoins un certain nombre d'hypothèses simplificatrices communes avec la modélisation quasi-statique :

- Variation des énergies cinétique et potentielle négligeables
- Pertes de charge négligeables
- Masse thermique des composants (hors fluides de travail) négligeable

À noter que cette modélisation prend en compte la gravité pour l'écoulement des fluides de travail entre les différents composants.

2.1. Principes de la modélisation quasi dynamique

Cette modélisation est régie par une succession d'état quasi-statique dont la fin d'une phase définit les conditions opératoires de la phase suivante. L'évolution dans le schéma de cette modélisation ne se fait donc pas en fonction du temps, mais phase par phase. Seule la phase $\alpha\beta$ est calculée de façon itérative afin de prendre en compte la chute de pression dans la bouteille BS_R ou BS'_R qui définit le point Im sur le diagramme de Mollier de la variante WGS (Figure III-5).

Les résultats de la simulation peuvent être visualisés via une sortie graphique présentée par la Figure III-9 (qui correspond sur cet exemple à une phase d'échange de travail). On retrouve sur cette figure l'ensemble des composants ainsi que leurs liaisons dans la configuration WGS. Chaque composant est placé sur le schéma de façon à respecter sa disposition réelle (selon l'axe vertical z) de manière à rendre compte des écoulements par gravité. Les différents fluides sont repérés par un code couleur, Liquide de transfert (LT) en orange, fluide de travail coté récepteur (wf_R) en vert, fluide de travail coté moteur (wf_M) en rouge et fluide caloporteur alimentant les échangeurs de chaleur aux trois niveaux de température en bleu. En marge de chacun des composants est indiqué, son nom, sa pression et son niveau de liquide de travail (en %). Pour les échangeurs de chaleur, il est également mentionné la température du fluide de travail, l'énergie échangée pendant la phase et le sens de l'échange d'énergie. Toutes ces informations permettent de visualiser phase après phase le comportement du procédé CHV3T en fonction de différents stimuli tel que l'évolution de température extérieure, certains dysfonctionnements (vanne défectueuse par exemple) et de tester différentes stratégies de contrôle-commande.

Afin de bien comprendre le fonctionnement de ce modèle quasi dynamique, il convient d'expliquer comment celui-ci est structuré.

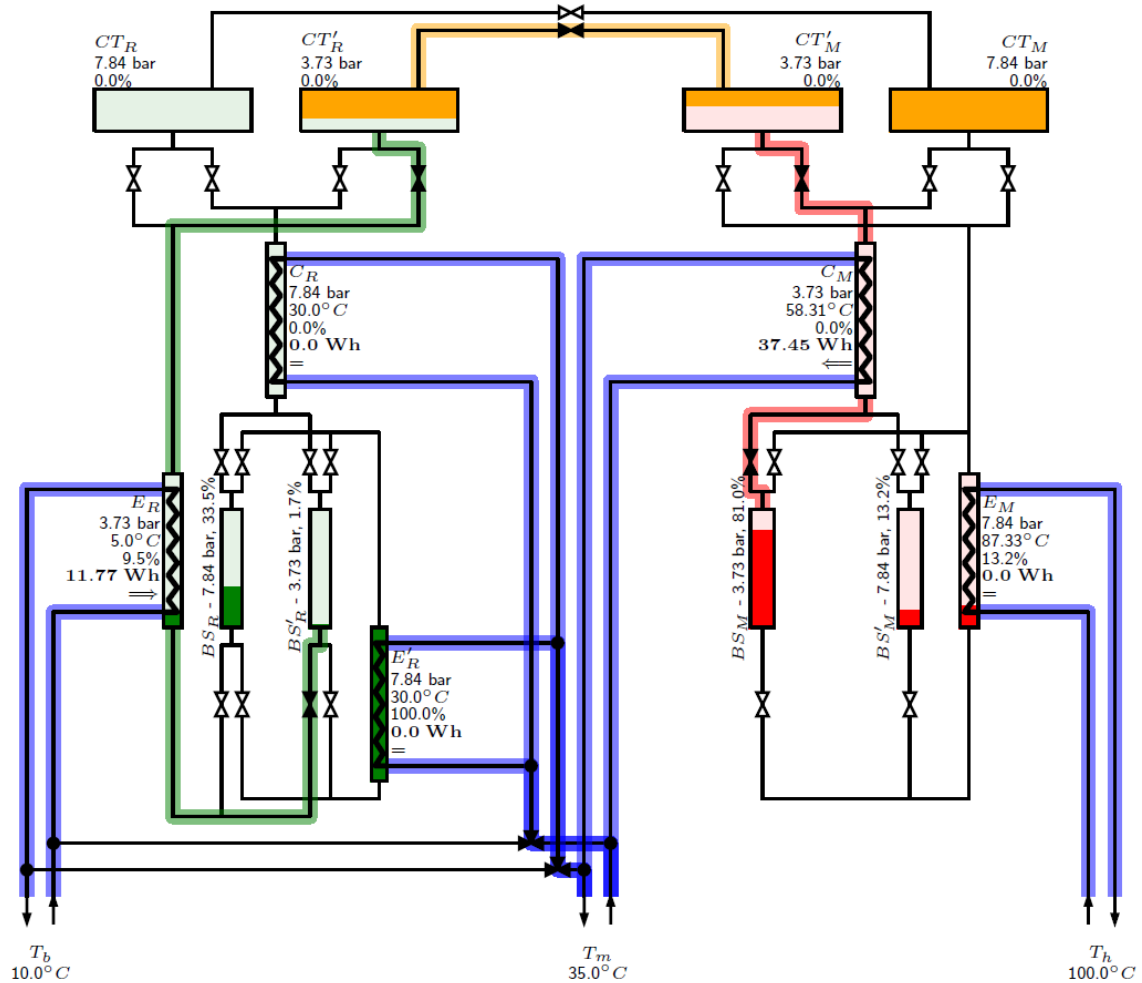


Figure III-9: Schéma présentant la sortie graphique de la simulation quasi-dynamique du procédé CHV3T-WGS sur un exemple, ici la phase de transfert de travail entre CT'_R et CT'_M

2.1.1. Modélisation d'un composant.

Pour cette modélisation dite quasi dynamique, le procédé a été modélisé en langage de programmation *Python*. Les équations régissant le fonctionnement des différents composants sont pour la plupart les mêmes que celles utilisées dans les sections II.2.1, II.2.2 et III.1.3 traitant de la modélisation quasi-statique. Seules les différences notables entre ces deux modélisations seront décrites ici. Pour ce modèle, chaque composant thermodynamique est constitué d'une classe appelée *Cmp*, elle-même composée de 3 classes nommées *Props*, *Design* et *Sketch*, chacune étant elles-mêmes composées d'un ensemble de sous-classes et de fonctions. Leurs fonctions sont décrites ci-dessous.

- **La classe *Props*** : Cette classe contient toutes les propriétés thermodynamiques du composant à un état donné, tel que le nom du fluide qu'il contient, la pression, la température, la masse volumique, le facteur qualité du fluide (la proportion des phases liquide et vapeur s'il est biphasique), l'énergie interne, l'enthalpie et l'entropie. Toutes ces propriétés sont calculées à partir de la base de données thermodynamique *CoolProp*. En plus de ces attributs, chaque classe contient un certain nombre de fonctions permettant de

réaliser les actions nécessaires au déroulement de la modélisation, tel que la comparaison des états thermodynamiques de différents composants. La fonction *phase* qui renvoie l'état thermodynamique du fluide dans le composant (liquide, biphasique, vapeur), ou la fonction *plot* qui permet de placer sur un diagramme de Mollier l'état thermodynamique du composant. Cela suppose que les grandeurs intensives du composant sont considérées uniformes. Si cette hypothèse semble irréaliste pour un cas particulier donné, il est toujours possible de le décomposer en sous-composants plus petits pour lesquels cette hypothèse devient acceptable.

- **La classe *Design*** : Elle permet de définir les paramètres géométriques du composant, tels que la hauteur du composant, la surface, le volume, ou l'altitude aux extrémités haute et basse. Ces informations sont nécessaires au calcul du niveau de fluide correspondant à l'état thermodynamique du composant. La classe *Design* contient également des fonctions, notamment la fonction "*call*" qui permet de remonter au volume en phase liquide à l'intérieur du composant.
- **La classe *Sketch*** : Celle-ci permet de stocker tous les paramètres nécessaires à la représentation graphique du composant tels que l'abscisse gauche, l'abscisse droite, l'abscisse moyenne, l'offset, l'ordonnée basse, l'ordonnée haute et l'ordonnée moyenne. Comme les deux autres classes, celle-ci contient un certain nombre de fonctions nécessaires par exemple pour représenter les niveaux de phase liquide ou gaz dans le composant.

Ces trois classes réunies dans la classe *Cmp*, permettent donc pour un composant aux géométries fixées, fonctionnant avec une charge de fluide et une température de travail connues, de calculer son état thermodynamique ainsi que le niveau de liquide du fluide de travail qu'il contient. L'exemple de la Figure III-10 représente le composant évaporateur E_M , chargé d'1kg de fluide R1233zd. Si le composant est fermé et maintenu à une température de 25°C la pression dans ce composant est à la pression de vapeur saturante du fluide R1233zd à 25°C, dans le cas présent 1,3 bar. Connaissant la masse du fluide R1233zd dans cet évaporateur et le volume interne de celui-ci, le modèle en déduit successivement la masse volumique globale, le fait que le fluide se trouve dans le domaine biphasique, le facteur de qualité du fluide c'est-à-dire la répartition massique en phase liquide et en phase vapeur, et finalement connaissant la masse volumique du liquide saturé à cette température et la géométrie du composant (de section interne constante selon l'axe vertical) le niveau de liquide dans celui-ci, soit 39,2% dans ce cas précis.

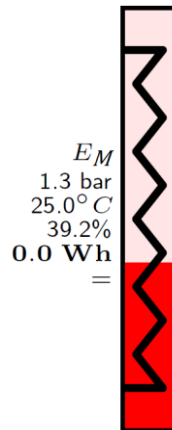


Figure III-10 : Représentation du composant évaporateur moteur (E_M) d'un volume de 2,54 L une fois chargé de (1kg) de fluide à son état d'équilibre à $T=25^\circ C$

Si l'on apporte une certaine quantité d'énergie au fluide de travail via un fluide caloporteur plus chaud dans l'évaporateur E_M , l'élévation de l'énergie interne permet de calculer le nouvel état thermodynamique du fluide. Comme on peut le voir dans la Figure III-11, une élévation de l'énergie interne induit une augmentation de la température et de la pression, ainsi que les diminutions du facteur de qualité et de la masse volumique du liquide ce qui a pour conséquence dans ce cas à une augmentation du niveau de liquide.

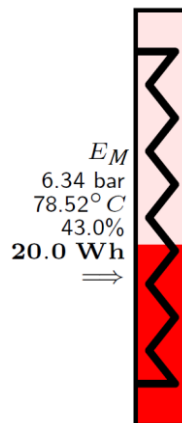


Figure III-11 : Représentation du composant évaporateur moteur (E_M) après lui avoir apporté une énergie de 20 Wh (état initial donné à la Figure II-27).

Ce cas de figure nous montre comment le modèle gère un composant unique et nous permet de connaître son état thermodynamique, quelles que soient les transformations occasionnées. Cela est généralisable à tous les composants avec des différences sur les échanges, système fermé ou ouvert, échange de la chaleur ou du travail... Par exemple le fluide de travail contenu dans le composant cylindre de transfert (CT) recevra, via le déplacement du liquide de transfert, un certain travail. En revanche par simplification on néglige les échanges de chaleur entre CT et l'environnement ainsi que ceux entre le fluide de travail et le liquide de transfert ou les parois du cylindre.

Dans la majorité des cas, les composants ne sont pas fermés, mais connectés à d'autres composants pour créer un système fermé plus grand. Il est toutefois nécessaire de les dissocier, car leurs propriétés intensives sont différentes. Une nouvelle classe *Cluster* a été créée pour gérer cela et est présentée dans la section suivante.

2.1.2. *Couplage des différents composants.*

Le procédé CHV3T implique de pouvoir connaître l'état thermodynamique d'ensembles de composants une fois reliés entre eux. On tire également souvent parti des écoulements gravitaires pour transférer le fluide à l'état liquide d'un composant à un autre. Il est donc indispensable de pouvoir calculer le nouvel état thermodynamique d'un sous-ensemble complet après connexion et de visualiser où se déplacera le liquide afin de pouvoir gérer tous les cas de figure possibles et disposer au mieux les éléments dans l'espace. Par exemple, une bouteille placée trop basse risquerait d'accumuler les condensats sans jamais pouvoir les évacuer.

Afin de simuler ces interactions, la classe *Cluster* a été développée. Son fonctionnement est relativement simple, en lui donnant comme attributs les différents composants à relier entre eux. La classe *Cluster* crée un agrégat de composants, partageant le même état thermodynamique.

$$\left\{ \begin{array}{l} V_t = \sum_i V_i \\ m_t = \sum_i \rho_i V_i \\ \rho_f = \frac{m_t}{V_t} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (54) \\ (55) \\ (56) \end{array}$$

En l'absence de transfert de travail ou de chaleur lors de leur mise en contact, la conservation de l'énergie interne est donnée par :

$$m_t u_t (P_f \rho_f) - \sum_i \rho_i V_i u_i = 0 \quad (57)$$

Cette équation est résolue, par dichotomie par exemple, en s'appuyant sur une base de données des fluides (*CoolProp*). L'altitude de chaque composant étant connue grâce à la classe *Design*, le niveau de liquide est déterminé en remplissant les composants connectés en partant du plus bas jusqu'au plus haut. À noter que les volumes internes des tubes de connexion ne sont pas pris en compte ici.

À titre d'exemple, la Figure III-12 nous montre la mise en communication de trois composants (Cylindre de transfert, échangeur et bouteille séparatrice) avec des pressions et des niveaux de fluide différents, avant et après leur connexion. On remarque que la pression s'uniformise bien et que le liquide présent dans le cylindre de transfert (bien plus gros comparativement aux échangeurs et bouteille séparatrice) vient remplir complètement la bouteille BS_R et 52,5% de l'échangeur de chaleur.

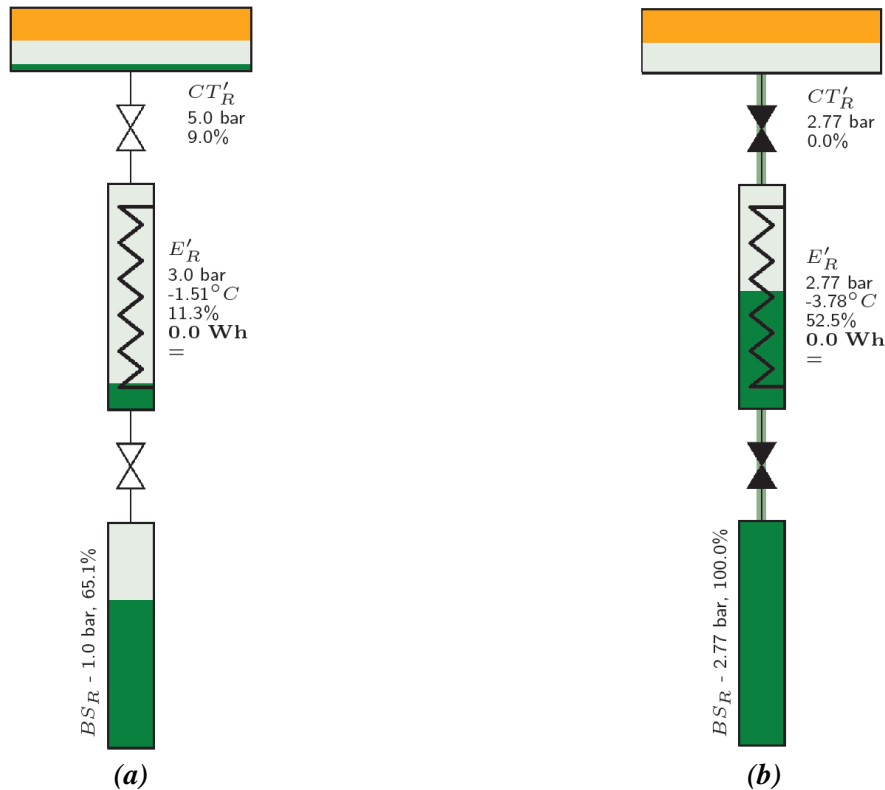


Figure III-12 : Mise en communication de composants de volumes différents (échelle non respectée), $V[CT'_R] = 40\text{ L}$, $V[E'_R] = 1,45\text{ L}$ et $V[BS'_R] = 1,95\text{ L}$ (a) Cluster de composants isolés (b) Cluster de composants après mise en communication.

Maintenant il est possible de tester différentes configurations afin de déterminer celle qui permettra le bon enchaînement des différentes phases du cycle CHV3T dans sa version WGS, notamment en permettant le bon écoulement des condensats. Cette configuration est présentée dans la Figure III-13. Celle-ci comprend de haut en bas, les 4 cylindres de transfert avec le côté fluide de travail vers le bas permettant aux éventuels condensats de s'écouler naturellement. En dessous se trouvent les condenseurs récepteur et moteur ; ceux-ci sont nécessairement plus bas que les cylindres de transfert pour recevoir les condensats et plus haut que les bouteilles séparatrices afin que celles-ci puissent recevoir le liquide venant des condenseurs par gravité. Au même niveau que les bouteilles séparatrices, les évaporateurs récepteurs et moteur. Enfin au plus bas se trouve l'évaporateur récepteur auxiliaire. Celui-ci permet de remonter le cylindre de transfert de P_i à P_h pendant sa phase de pressurisation sans avoir à connaître ou contrôler les niveaux de liquide au sein des bouteilles BS_R et BS'_R .

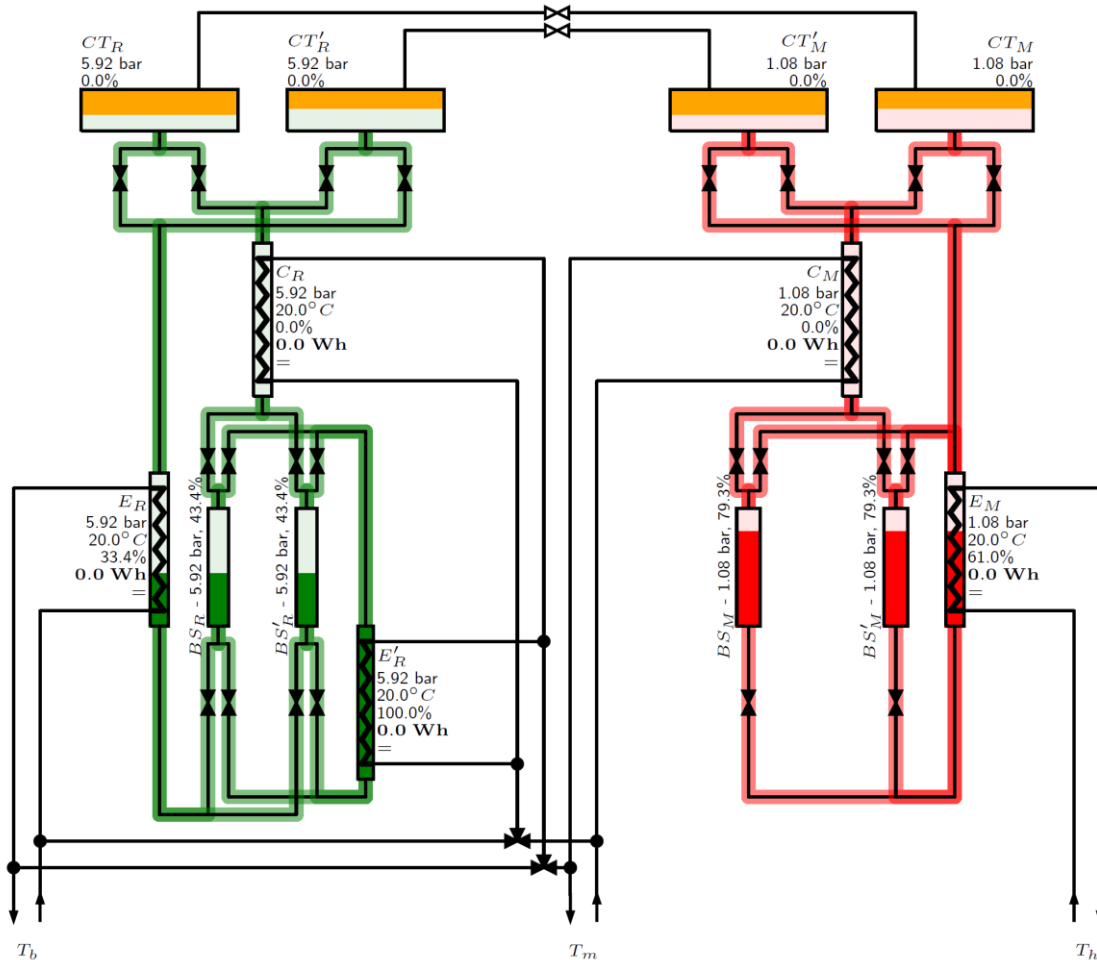


Figure III-13 : Assemblage de l'ensemble des composants du procédé CHV3T-WGS et mise en communication pour l'introduction des fluides de travail (R1234yf et R1233zd) à une température ambiante de 20°C

Une fois les composants assemblés virtuellement et remplis des fluides de travail moteur et récepteur, il est possible de définir le contrôle-commande du procédé.

2.2. Mise en place d'une stratégie de contrôle-commande

L'enchaînement des phases nécessaires au bon fonctionnement du procédé CHV3T nécessite la commutation simultanée d'un certain nombre de vannes. Mais des contraintes de sécurité pour le matériel et l'environnement impliquent qu'une attention toute particulière doit être apportée à la stratégie de contrôle-commande du procédé. Par exemple la membrane des cylindres de transfert peut être détruite si elle est soumise à un différentiel de pression trop important ou rapide. Le principal avantage de cette modélisation quasi dynamique est de pouvoir observer les conséquences sur le cycle de différentes actions qu'elles soient voulues ou accidentelles et ainsi de s'en prémunir en prévoyant différentes actions correctrices.

La première étape avant de pouvoir tester différentes stratégies de contrôle-commande est d'initialiser le cycle.

2.2.1. *Initialisation du procédé*

On peut voir dans la Figure III-13 qu'une fois les différents composants remplis des fluides frigorigènes à température ambiante, les conditions nécessaires au démarrage de la phase $\alpha\beta$ ne sont pas réunies, notamment en raison du différentiel de pression trop important entre la partie motrice et la partie réceptrice.

Une phase d'initialisation est donc nécessaire. Celle-ci se compose d'un enchaînement de 6 étapes permettant de mettre l'installation dans des conditions qui permettront de lancer la première phase de fonctionnement réel :

1. Descendre l'ensemble du cycle récepteur à P_b .
2. Élever la pression coté cycle moteur jusqu'à P_b .
3. Une fois que les deux cycles sont à la même pression, mettre en communication CT'_R et CT'_M afin de transférer tout le fluide de transfert dans CT'_R en évaporant une fraction du fluide dans E_M et en condensant dans C_R .
4. Même opération avec CT_R et CT_M , déplacement du fluide de transfert dans CT_M en apportant de la chaleur dans E'_R et en condensant dans C_M .
5. Remonter la pression coté cycle récepteur des composants CT_R , C_R , BS_R , BS'_R et E'_R à P_h en amenant la température de E'_R à T_{mR} .
6. Remonter la pression coté cycle moteur des composants CT_M , BS_M' et E_M à P_h en amenant la température de E_M à T_h .

L'ensemble des 6 étapes décrites précédemment devrait prendre approximativement 3 minutes (durée estimée avec les puissances des échangeurs, mais en négligeant les masses thermiques métalliques). Le procédé est alors initialisé (Figure III-14) et prêt à fonctionner. La séquence complète est disponible en annexe (Annexe 2). Cette séquence fait également office de refroidissement d'urgence et de réinitialisation de l'installation en cas de défaut.

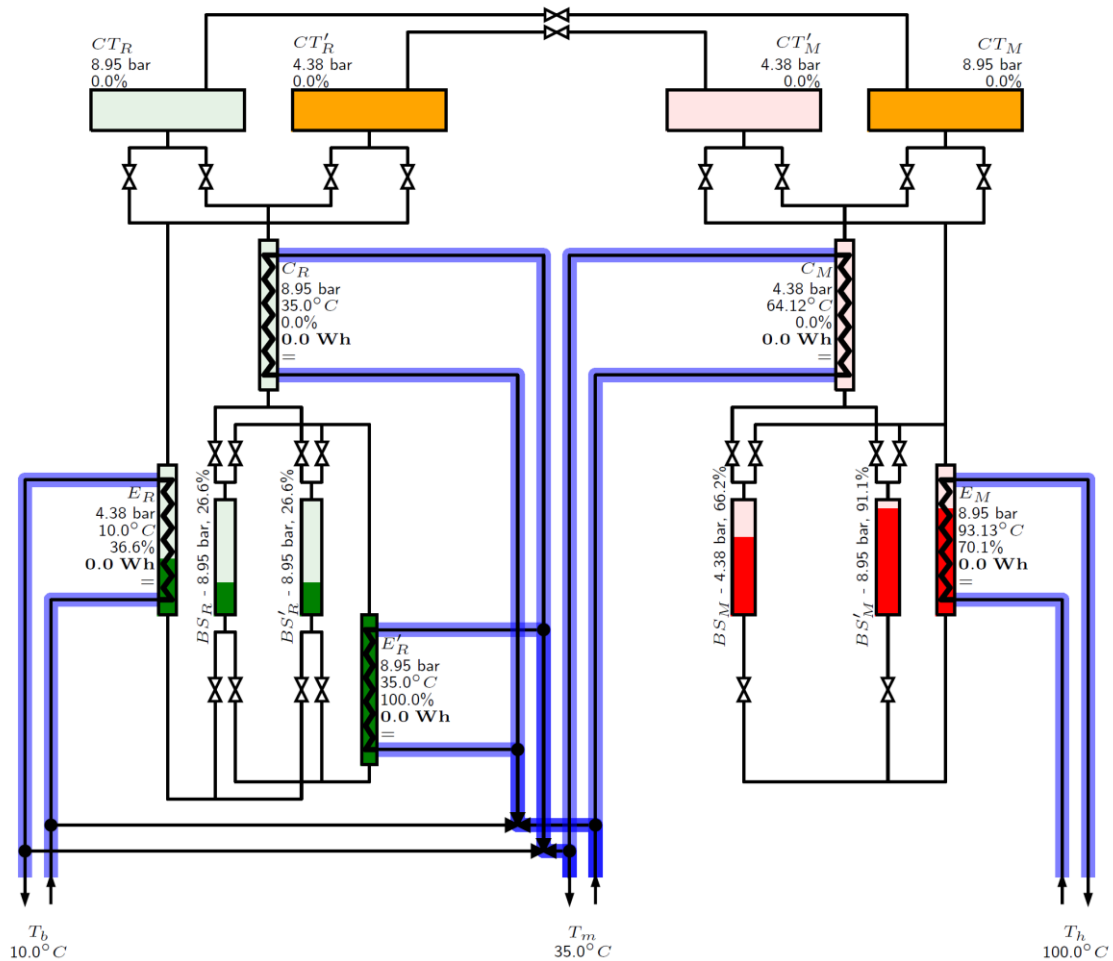


Figure III-14 : État thermodynamique des différents composants en fin de phase d'initialisation

Une fois le cycle initialisé on peut définir la stratégie de commande des différentes phases du cycle réel dans ces conditions opératoires nominales.

2.2.2. Contrôle-commande en conditions nominales

Comme expliqué dans la section III.1.3.2, le procédé CHV3T-WGS fonctionne en demi-cycles de 3 phases successives :

- Phase de transfert de travail, dite phase " $\alpha\beta$ "
- Phase de récupération d'énergie interne, dite phase " $\beta\gamma$ "
- Phase de régénération, dite phase " $\gamma\alpha$ "

Initialement, le procédé se trouve à l'état thermodynamique donné dans la Figure III-15, prêt à démarrer un nouveau demi-cycle.

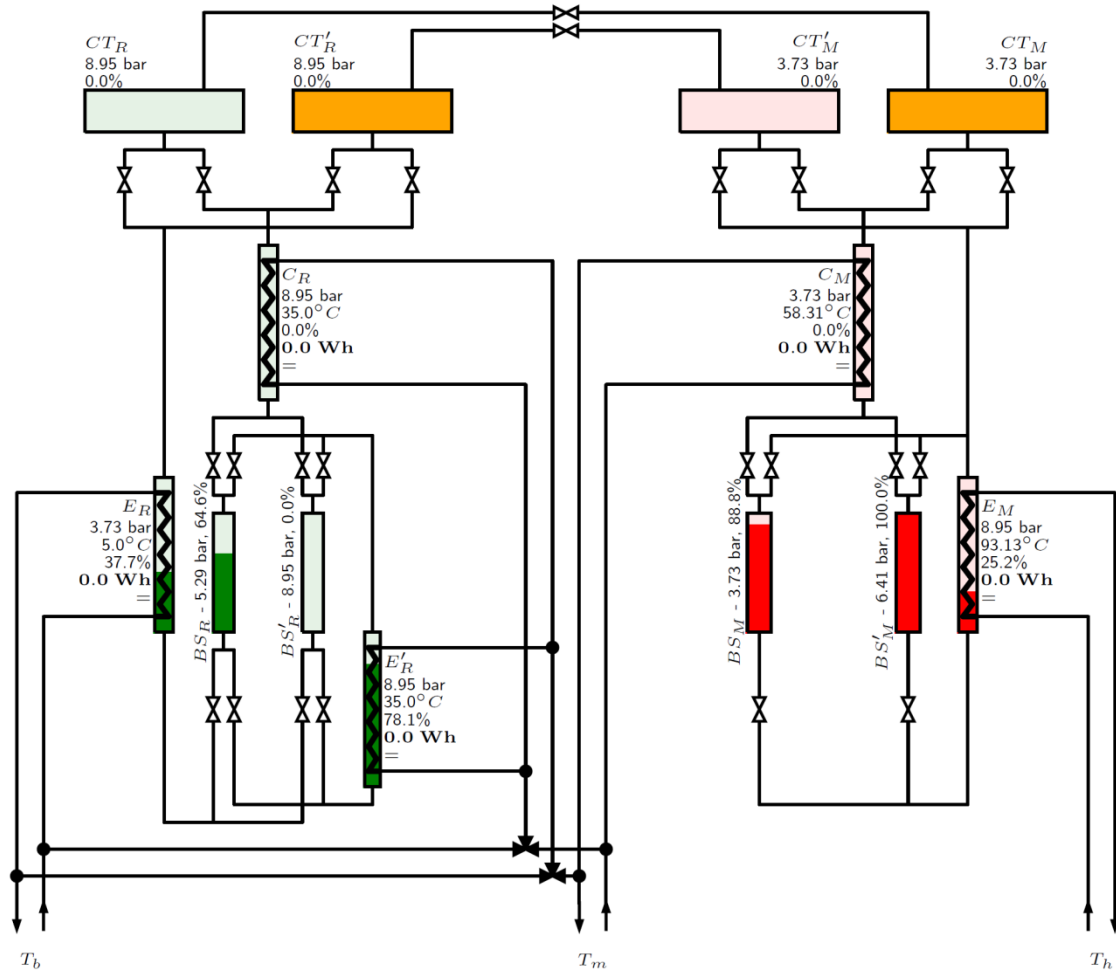


Figure III-15 : État thermodynamique des différents composants en fin de demi-cycle, prêt à en démarrer un nouveau

→ **Phase $\alpha\beta$:**

La phase $\alpha\beta$ est la phase principale du procédé ; c'est durant celle-ci que le froid et le chaud sont produits au sein des évaporateurs et condenseurs. La phase $\alpha\beta$ est ici découpée pour une meilleure compréhension en deux sous-phases (simultanées en fait).

Au cours de la première sous-phase, tel qu'indiqué dans la Figure III-16, les composants CT'_R , E_R et BS_R coté récepteur et CT'_M , C_M et BS_M coté moteur sont mis en communication. Les évaporateur et condenseur E_R et C_M sont tous deux à leur température d'équilibre, impliquant théoriquement une pression égale dans chacun de ces composants. Les cylindres CT'_R et CT'_M peuvent alors être mis en communication de façon à faire transiter le fluide de transfert de l'un vers l'autre. C'est durant cette phase que le froid est produit au niveau de l'évaporateur E_R et la chaleur dégagée au niveau du condenseur C_M . Néanmoins il est probable que suite à l'isolement des fluides de travail dans ces échangeurs toujours traversés par les caloporteurs (fin du cycle précédent) les pressions en leurs seins ne soient pas égales. Dans ce cas, de façon à ne pas endommager la membrane des CT, il est envisagé soit une ouverture progressive de l'électrovanne sur le liquide de transfert, soit la mise en communication au préalable des CT par le biais d'un "capillaire", en parallèle avec la canalisation principale, de façon à égaliser leurs pressions. Ces bipses ne sont pas représentés sur la visualisation graphique de la simulation

quasi-dynamique, néanmoins ils sont effectivement prévus dans le plan final du procédé (Figure V-2 du chapitre V) ainsi qu'à la conception des cylindres de transfert (voir section III.1.2).

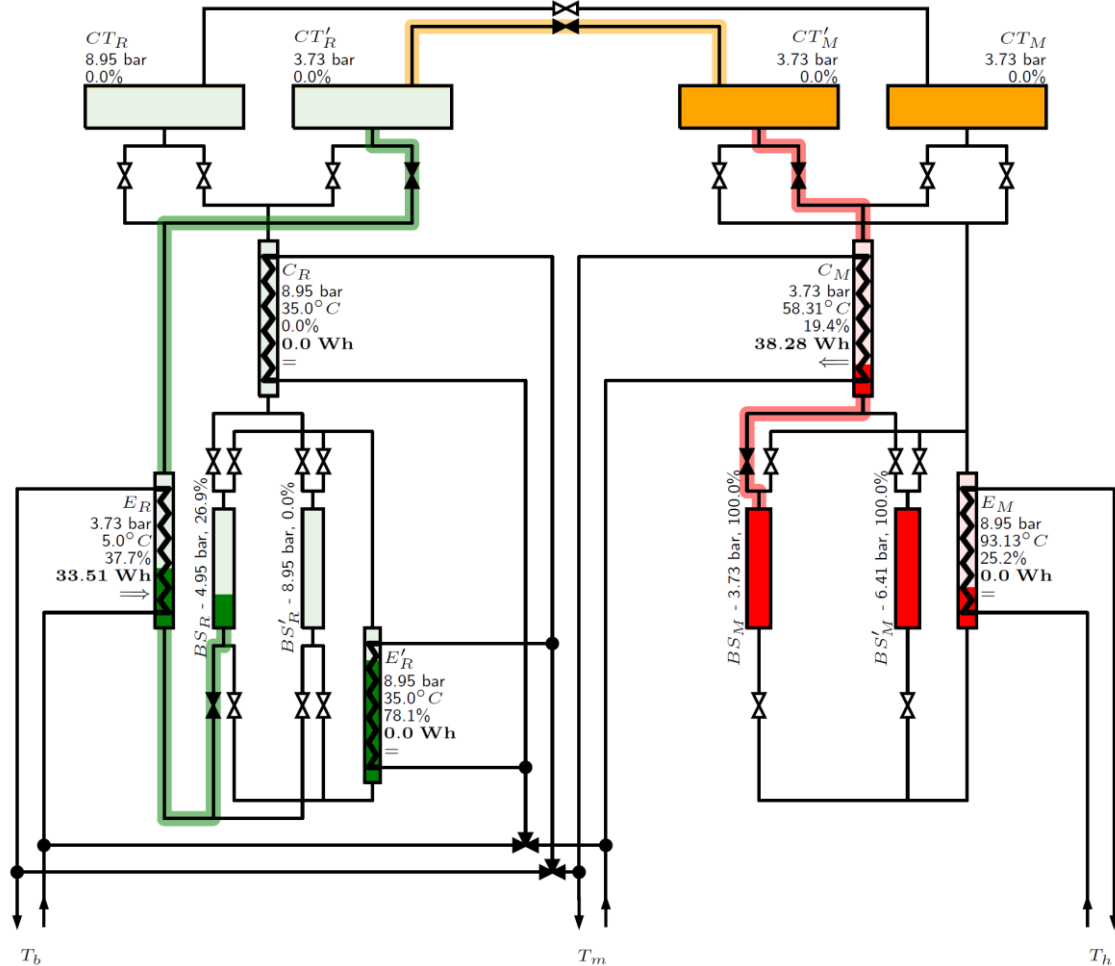


Figure III-16 : État final (partiel) de la première moitié de la phase $\alpha\beta$ du procédé CHV3T-WGS avec visualisation des composants connectés.

La seconde sous-phase, décrite dans la Figure III-17, s'exécute en même temps que la première. Les composants CT_R , E_R et BS'_R coté récepteur et CT_M , C'_M et BS'_M coté moteur sont mis en communication. L'énergie solaire vient évaporer le fluide dans le générateur de vapeur E_M . Le fait que les bouteilles séparatrices soient placées à la même hauteur que l'évaporateur permet à ces deux composants d'agir comme un bouilleur : le fluide contenu dans la bouteille BS'_M est au même niveau que celui dans l'évaporateur E_M et transite au fur et à mesure de son évaporation dans ce dernier. Cette configuration a été choisie pour limiter la hauteur totale du procédé CHV3T-WGS, l'évaporateur auxiliaire étant relativement compact contrairement aux évaporateurs E_R et E_M qui sont plus allongés. Ainsi l'encombrement du dispositif est limité (critère important dans une application résidentielle). Dans le cadre d'un projet où la hauteur totale du procédé n'est pas contraignante, les évaporateurs E_R et E_M peuvent être placés sous les bouteilles séparatrices de manière à garder les évaporateurs noyés pendant plus longtemps et ainsi maximiser leur efficacité.

On retrouve bien dans la partie réceptrice un fonctionnement tel qu'on le retrouve dans une pompe à chaleur classique en mode chauffage, c'est à dire, la récupération d'énergie "gratuite" dans une source de chaleur extérieure (l'air ambiant par exemple) afin de la restituer à un niveau de température plus élevé dans la maison, ou inversement en mode refroidissement, le captage des calories à l'intérieur de la maison pour leur restitution à l'extérieur. On remarquera également le positionnement de l'évaporateur auxiliaire E'_R en dessous des deux bouteilles séparatrices BS_R et BS'_R . Ce positionnement nous assure que celui-ci sera toujours rempli de liquide, son volume de liquide étant dimensionné de façon à garantir que ce volume de liquide une fois évaporé dans E'_R permet de remplir complètement le cylindre CT de gaz à P_h pendant la dernière phase du processus. Sans cette "astuce", les bouteilles séparatrices devraient être équipées de double enveloppe (ou d'un échangeur interne) afin de pouvoir évaporer leur contenance et de couvrir les capteurs de niveau afin de s'assurer que la quantité de liquide suffit à la remise en pression du cylindre de transfert.

La partie motrice permet elle, la captation de l'énergie solaire qui sert à produire le travail nécessaire au fonctionnement de la partie réceptrice, avec en plus, la valorisation des chaleurs fatales au niveau du condenseur C_M pour la production de chauffage.

Pour rappel, ces deux sous étapes qui se déroulent simultanément dans la variante WGS devaient être réalisées en deux étapes distinctes sur les autres variantes du procédé (WG, WL, WLG, WGL).

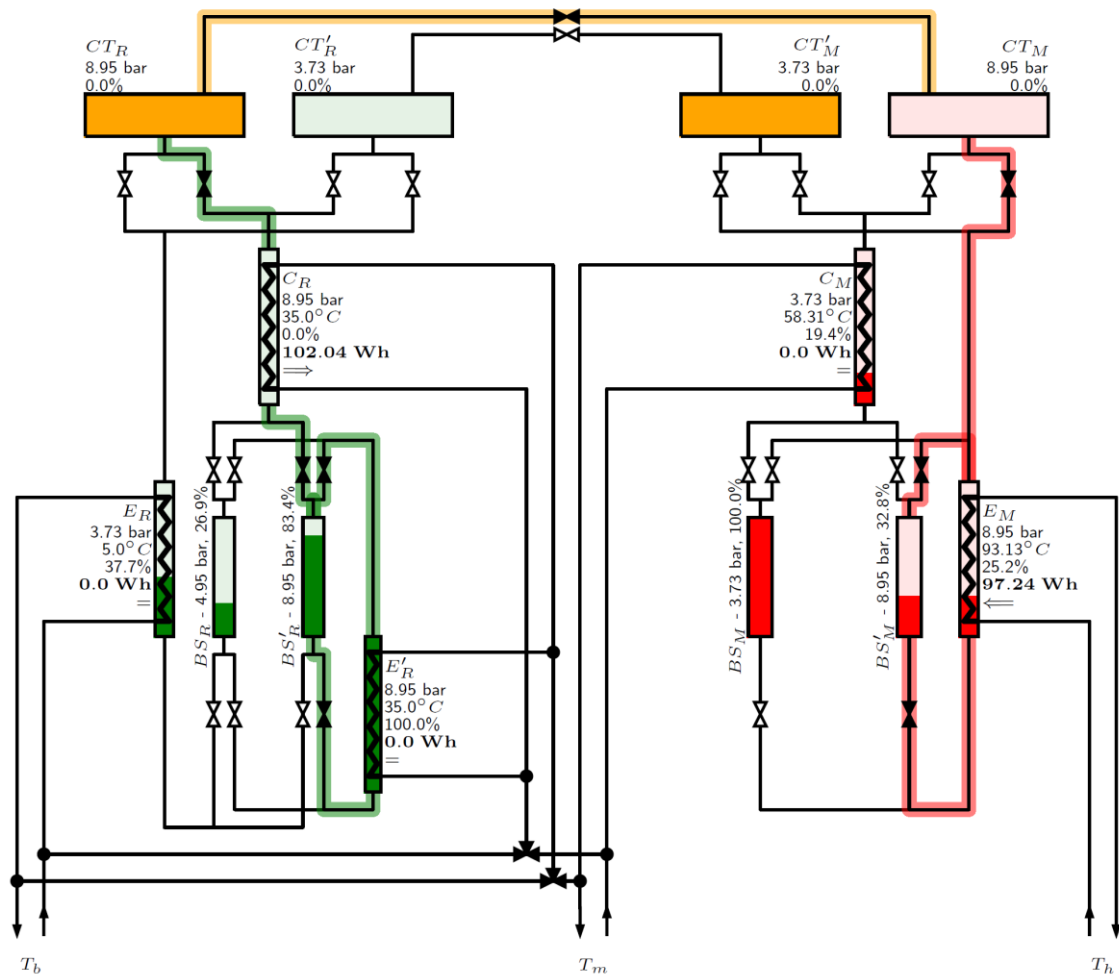


Figure III-17 : État final (partiel) de la deuxième moitié de la phase $\alpha\beta$ du procédé CHV3T-WGS

→ **Phase $\beta\gamma$** : La phase dite $\beta\gamma$ est la phase de récupération d'énergie interne décrite dans la Figure III-18. Celle-ci est réalisée en mettant en communication, coté récepteur, les composants CT'_R , C_R et BS'_R entre eux, et CT'_M , C_M et BS'_M coté moteur. En mettant en communication la bouteille séparatrice BS'_R alors isolée à P_h avec le cylindre de transfert CT'_R à P_b (et inversement coté moteur), une pression d'équilibre s'instaure à P_m dans chacun des composants. De cette façon, le travail nécessaire à la pressurisation finale (de P_m à P_h) du cylindre de transfert CT'_R nécessite moins d'énergie à l'étape $\gamma\delta$ suivante. En effet la chaleur nécessaire à la pressurisation de P_m à P_h est prélevée à T_{mR} dans l'habitat et donc, impacte négativement le COA de l'installation. La diminution de l'énergie nécessaire permet donc d'améliorer les performances du procédé. Autre avantage, durant la prochaine phase $\alpha\beta$ de production de froid, la détente isenthalpique qui alimente en fluide l'évaporateur E_R ne se fera pas depuis P_h , mais depuis P_m , à une enthalpie spécifique inférieure permettant de ce fait une production de froid légèrement plus grande. Cette phase, déjà présente sur la variante WG, permet une amélioration des performances vis-à-vis de la variante W_0 . À noter que cette amélioration est rendue plus simple avec l'évaporateur auxiliaire E'_R .

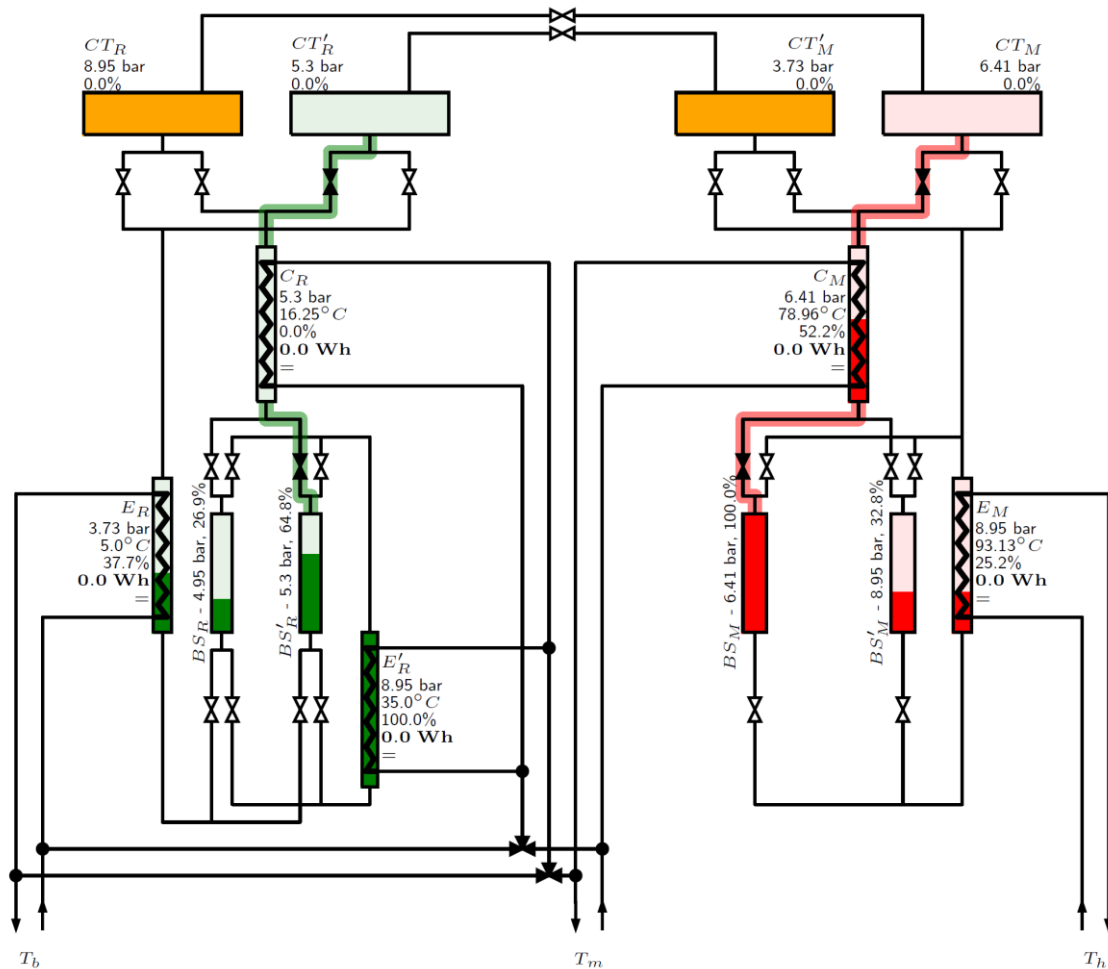


Figure III-18 : État final de la phase $\beta\gamma$ du procédé CHV3T-WGS

→ **Phase $\gamma\delta$** : La troisième et dernière phase est destinée à la réinitialisation des pressions dans les cylindres de transfert CT'_R et CT_M , c'est à dire la pressurisation à P_h du cylindre CT'_R et la détente des vapeurs dans CT_M pour abaisser sa pression à P_b . Cette étape est réalisée en mettant en communication les composants CT'_R , BS_R et l'évaporateur auxiliaire E'_R coté récepteur, et les composants CT_M , C_M et BS'_M coté moteur (Figure III-19). L'évaporateur auxiliaire E'_R permet ainsi la remise en pression à P_h de la bouteille séparatrice BS_R et du cylindre de transfert CT'_R . La condensation des vapeurs dans C_M permet elle de redescendre CT_M et BS'_M à P_b .

Le procédé se retrouve alors dans les mêmes conditions thermodynamiques qu'au début de la phase $\alpha\beta$, avec néanmoins inversion des états des cylindres CT_R/CT'_R , CT_M/CT'_M et des bouteilles séparatrices BS_R/BS'_R et BS_M/BS'_M . Les trois phases peuvent alors recommencer en intervertissant le rôle des cylindres de transfert ainsi que celui des bouteilles séparatrices. Une estimation des puissances échangées au sein des échangeurs de chaleur permet de remonter au temps nécessaire pour chacune de ces phases ; au total, un demi-cycle tel que décrit précédemment dure près de 1 minute.

Enfin cet outil de modélisation quasi dynamique permet d'envisager quelles actions correctrices seraient à commander en fonction de perturbations externes non contrôlées.

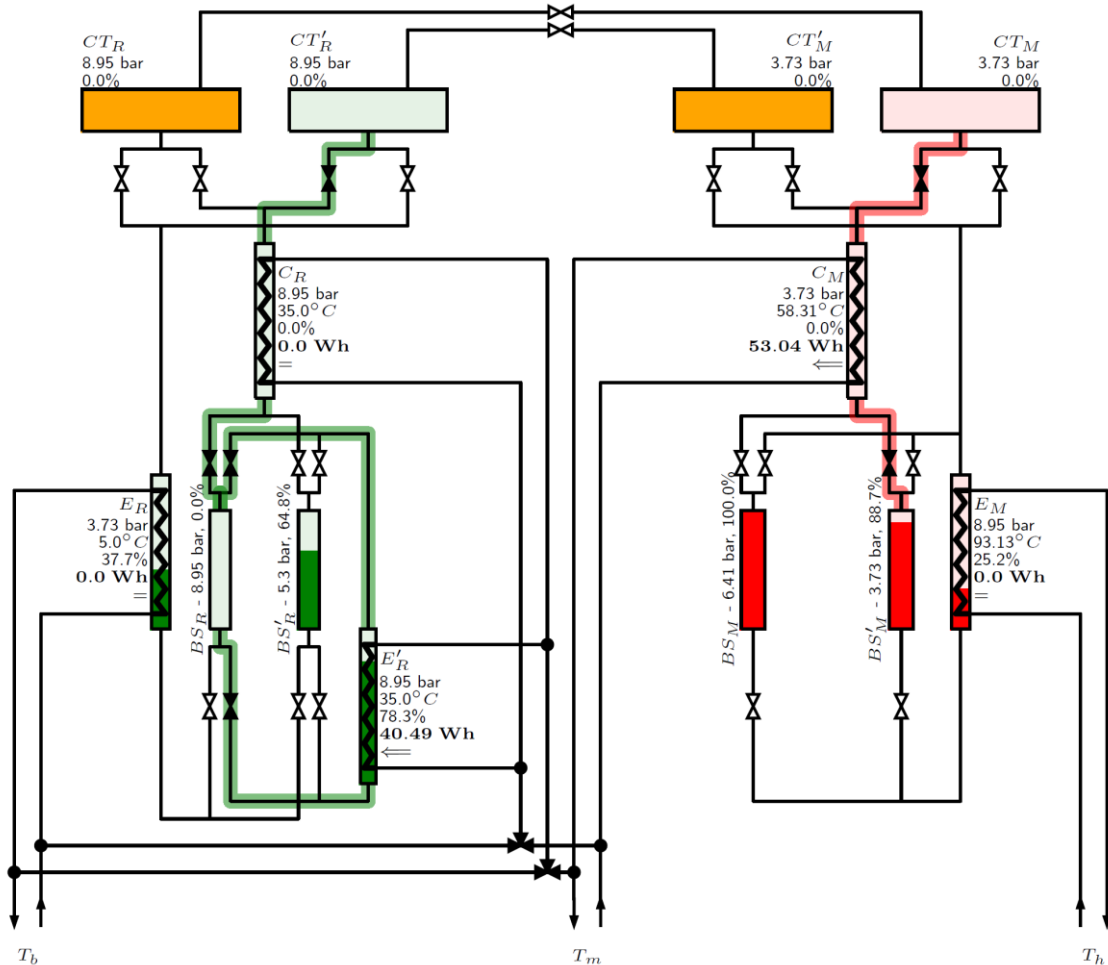


Figure III-19 : État final de la phase $\gamma\delta$ du procédé CHV3T-WGS

2.2.3. Actions correctrices en conditions perturbées

En plus des phases décrites ci-dessus, des actions non systématiques, dites correctrices, car parfois nécessaires au bon déroulement du procédé, ont été étudiées. Ces actions correctrices ont trois missions principales :

- Prévenir les dérives du système pour éviter l'apparition d'un état bloquant,
- Aider le système à sortir des phases transitoires (initialisation, arrêt d'urgence ou permutation avec l'ORC),
- maintenir le plus possible le système dans un état proche de celui nécessaire à un redémarrage à chaud.

Concrètement, elles ne représentent pas des phases prédéfinies, mais consistent à actionner certaines électrovannes pour éviter les situations décrites ci-dessus. En cas d'utilisation du procédé en dehors de sa plage d'utilisation, d'une variation brutale des conditions opératoires ou de mauvais déroulements des cycles nominaux dûs à une panne de capteur par exemple. Il est souvent possible de renvoyer le composant qui pose problème à son état thermodynamique normalement défini sans avoir à demander une nouvelle phase d'initialisation. Il est possible, par exemple, d'ajuster les pressions dans les bouteilles séparatrices en les connectant momentanément à l'évaporateur auxiliaire ou au condenseur, de compenser le manque de liquide dans une des bouteilles séparatrices en puisant le liquide manquant dans la seconde bouteille ou

d'effectuer un basculement des membranes si cela s'avère nécessaire. Ces actions peuvent se déclencher pendant, ou entre deux phases nominales, afin que l'évolution du procédé ne s'en retrouve pas affecté.

2.3. Influence des conditions opératoires sur le cycle

Cette partie vise à étudier le comportement du procédé quand celui-ci est soumis à un nombre important de cycles sous conditions opératoires fixes ou variables. En effet un des dangers, difficile à mettre en évidence sans cette simulation est qu'une évolution même lente de la température extérieure entraîne une distribution non maîtrisée des niveaux de liquide dans chacun des composants, venant compromettre l'aspect symétrique du fonctionnement du procédé. Bien que les actions correctrices soient faites pour empêcher ce genre d'événements, une utilisation trop fréquente de celles-ci pourrait affecter significativement les performances du procédé.

Afin de faciliter la visualisation de l'évolution des niveaux de liquides, une figure simplifiée de ces niveaux dans chacun des composants est donnée dans la Figure III-20. Les barrettes de couleur (verte pour la partie réceptrice, rouge pour la partie motrice) dans cette représentation simplifiée sont proportionnelles en longueur aux volumes de liquide à l'état considéré du système (couleur franche) ou aux volumes maximums de liquide permis par le contenant (couleur grisée). Leur représentation de gauche à droite et de bas en haut suit la position spatiale des composants dans la représentation complète. Ainsi la représentation des volumes des CT n'est là que pour la cohérence d'ensemble puisque, s'il y a condensation dans ces composants, les condensats sont drainés vers les condenseurs correspondants.

La modélisation quasi dynamique permet donc de comparer les évolutions des niveaux de liquide des fluides de travail au cours du temps après un grand nombre de demi-cycles effectués.

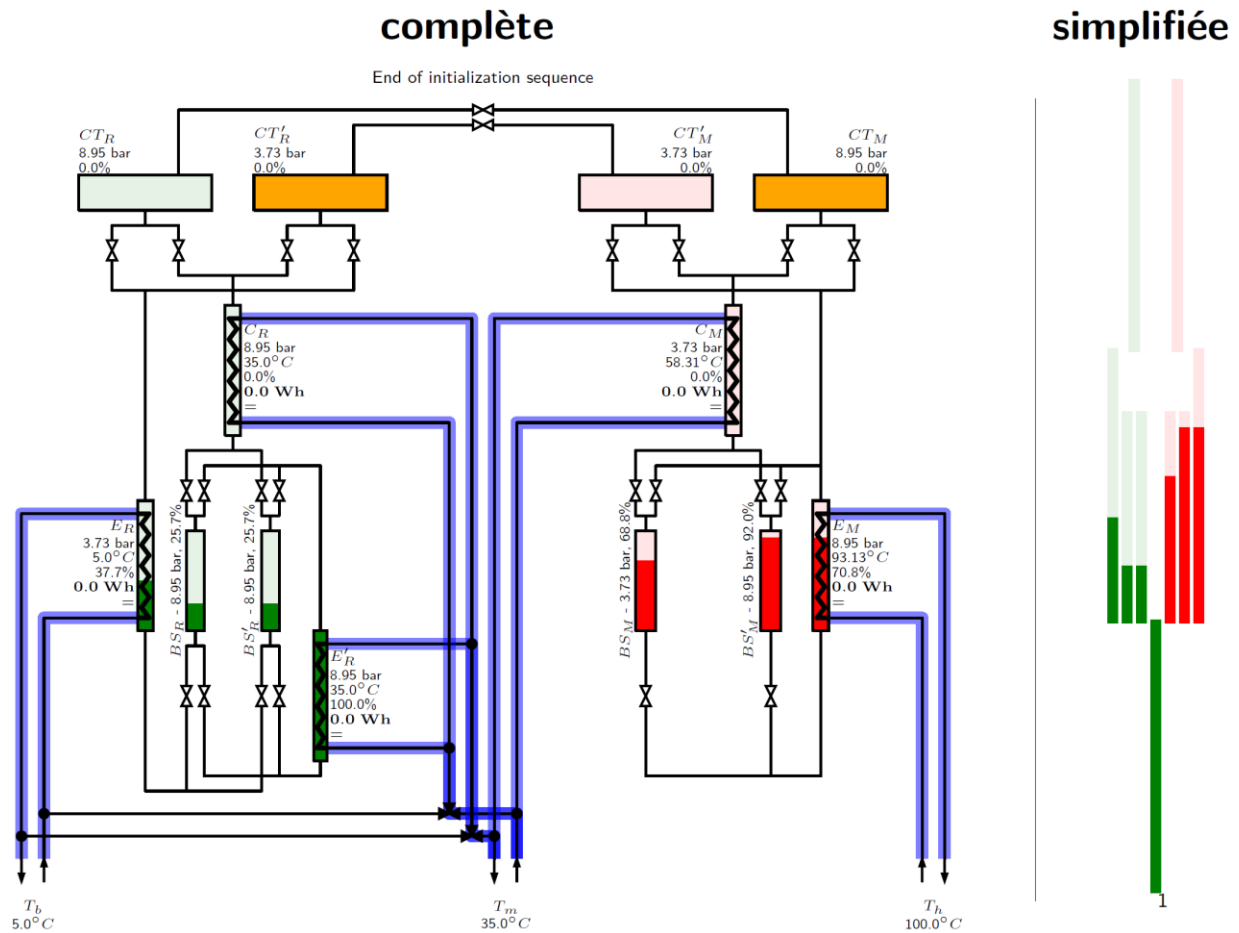


Figure III-20 : Représentation complète et simplifiée du volume des fluides de travail à l'état liquide (couleur franche) dans les différents échangeurs et bouteilles séparatrices (volume maximal permis en grisé).

Ainsi on peut visualiser l'évolution des niveaux de liquide dans chacun des composants, cycle après cycle, et même demi-cycle après demi-cycle (Figure III-21). Les demi-cycles sur fond gris, sont les demi-cycles impairs tandis que les demi-cycles sur fond blanc sont les demi-cycles pairs. Les différences observées durant les premiers cycles de fonctionnement découlent de l'utilisation alternée des cylindres de transfert et des bouteilles séparatrices avec des états initiaux qui ne sont pas parfaitement les mêmes. On constate dans cette figure qui représente 25 cycles sous conditions opératoires fixes, que l'on observe des évolutions notables des niveaux de fluides entre les demi-cycles pairs et impairs. Cette différence tient essentiellement d'un déséquilibre au démarrage des niveaux de liquide dans les bouteilles séparatrices. Celui-ci se répercute de cycle en cycle, avec une tendance à la convergence. En effet, on observe bien sur les 6 derniers demi-cycles (Figure III-21-b) que les variations de niveaux de liquide sont complètement atténuées. Cela démontre que naturellement et sans besoins des actions correctrices, les niveaux de liquide dans chacun des composants, auront tendance à se stabiliser d'un cycle à l'autre.

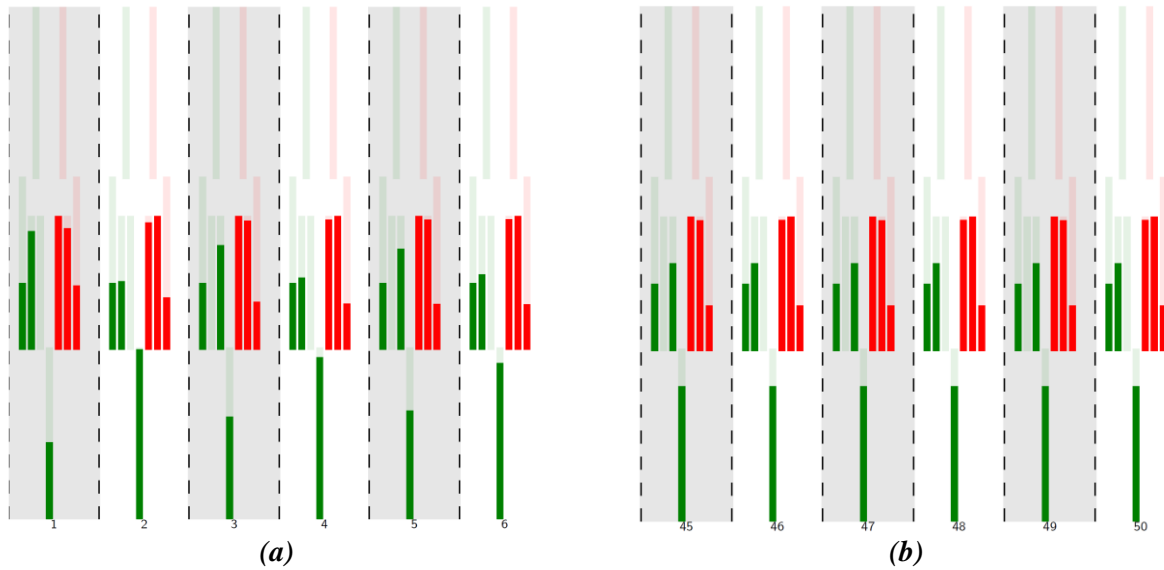


Figure III-21 : (a) Représentation des niveaux de liquide dans les composants après 6 premiers demi-cycles après initialisation. (b) Représentation des 6 derniers demi-cycles sur un total de 25 cycles.

Ce point, attendu pour un fonctionnement en conditions opératoires fixes, est néanmoins beaucoup plus compliqué à appréhender sous conditions opératoires variant d'un cycle à l'autre. Trop de paramètres sont interdépendants. La Figure III-22 représente l'évolution des niveaux de liquide dans chacun des composants sur un total de 50 cycles, sous les conditions opératoires variables suivantes : une évolution progressive des températures T_b ($+10^\circ\text{C}$) et T_m (-10°C) qui correspondent à une élévation de la température extérieure et une diminution de la température de chauffage en mode chauffage tout le long de la simulation.

Cette simulation amène néanmoins les mêmes conclusions que celles faites précédemment, c'est-à-dire une tendance à la stabilisation des niveaux de liquide du système malgré des conditions opératoires variables (à faible vitesse toutefois).

Le procédé CHV3T-WGS semble robuste dans la mesure où il se stabilise après quelques cycles suite à des perturbations modérées sachant qu'aucun recours aux actions correctrices n'a été nécessaire. Parmi les nombreux tests effectués, seuls les tests en dehors des bornes de la plage de fonctionnement prévue initialement ont nécessité le recours aux actions correctrices pour maintenir un fonctionnement correct et non divergent du procédé. Autre avantage, cette simulation a permis de définir très précisément quels outils d'acquisitions sont indispensables au bon fonctionnement du procédé.

La simulation quasi dynamique nous a également montré que d'un cycle sur l'autre, il serait impossible de conserver une température parfaitement stable au niveau des sources et puits de chaleur. Avec d'un côté, un ensoleillement continu, mais variable, et de l'autre des évaporateurs qui puisent de la chaleur de façon discontinue au grès des cycles. Ces fluctuations de température entraînent des différences de pressions entre les cycles moteur et récepteur, qui peuvent entraîner la destruction des membranes si celles-ci ne sont pas correctement gérées. Ces dernières étant conçues très fines de manière à ne pas entraîner de pertes de travail de par leur déformation.

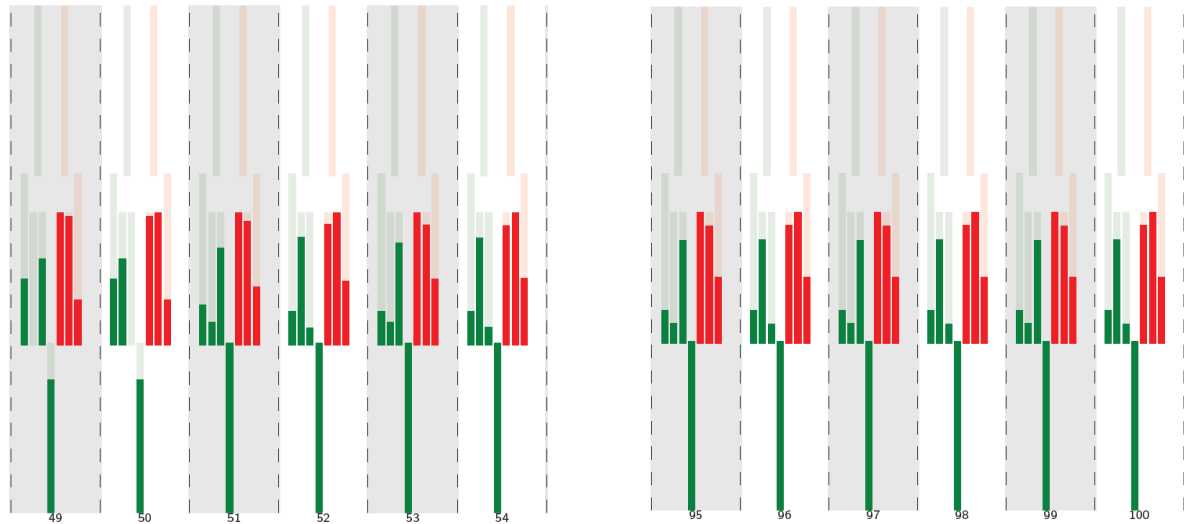


Figure III-22 : (a) Représentation des niveaux de liquide dans les composants après 6 premiers demi-cycles en appliquant une rampe de température de $+10^{\circ}\text{C}$ sur T_b et -10°C sur T_m sur un ensemble de 50 cycles (b) Représentation des 6 derniers demi-cycles

Différentes solutions peuvent être proposées pour pallier à ce problème :

- La mise en place d'un stockage permettrait de lisser les variations de température dues à une fluctuation de l'énergie solaire captée. Celui-ci peut être dimensionné de façon à rendre ces variations "tolérables", sans toutefois régler complètement la question.
- Limiter les éventuels chocs de pression sur les membranes en imposant de fortes pertes de charge à l'ouverture des vannes qui relient les cylindres de transfert.
- Utiliser des membranes plus épaisses susceptibles de résister à des chocs de pressions de quelques bars.

Ces différentes propositions peuvent être cumulées afin de mieux répondre aux divers cas de figure rencontrés, et devront être testées dans le cadre d'applications expérimentales. Il faut cependant souligner que ces solutions engendreront forcément des pertes qui n'ont pas été comptabilisées jusqu'à présent.

Cette question permet de souligner la question du stockage. Si celle-ci n'a pas été détaillée dans cette étude. Le recours à un stockage thermique apparaît être indispensable. Or le dimensionnement de celui-ci nécessite de prendre plusieurs paramètres en compte. Comme cela a été vu dans la section II.1.1.1, c'est la température T_b (qui dépend de la température extérieure en mode chauffage ou de la température de consigne en mode rafraîchissement) qui impose la température T_h pour permettre le bon fonctionnement du procédé. Comme cela a été dit précédemment, cette température T_h risque d'être complexe à maintenir avec une source de rayonnement variable et un procédé qui fonctionne de façon discontinue. Cette question n'empêche en rien la réalisation d'un prototype où les sources de chaleur seraient stables, mais doit être mûrement réfléchi avant d'envisager une application solaire.

Concernant les performances, la simulation quasi dynamique n'apporte pas plus de précision que la simulation quasi-statique (traitée dans la section III.1.3.4), leurs hypothèses simplificatrices étant les mêmes, à savoir : variations d'énergies cinétique et potentielle négligées, pas de pertes de charge, pas d'inertie thermique des composants.

3. Conclusion

Ce chapitre a permis tout d'abord d'identifier, analyser et remédier en partie aux problèmes rencontrés lors des travaux précédents effectués sur le procédé CHV3T par M.Martins. Ainsi des solutions ont été proposées pour chacun de ces problèmes, ce travail a permis de mettre au point une nouvelle configuration technologique de cylindre de transfert, mais aussi une nouvelle variante de procédé dite CHV3T-WGS. L'intérêt essentiel de cette nouvelle variante réside dans la simplification du contrôle-commande du procédé en réduisant de 4 à 3 le nombre de phases par demi-cycles, mais elle permet également une gestion des condensats simplifiée et peut également être considérée comme plus robuste vis-à-vis de la variante CHV3T-WG. La modélisation en quasi-statique de cette nouvelle variante a permis une évaluation de ses performances pour toute une série de couples de fluides de travail. Ces performances sont, comme attendu, très proches de la variante antérieure dite CHV3T-WG avec un COP_{sol} de 0,31 et un COA_{sol} de 0,89 en considérant un $T_b = 12\text{ °C}$ et un $T_{mR} = 35\text{ °C}$.

Cette variante a ensuite fait l'objet d'une modélisation dite quasi-dynamique dans le but de lever certaines interrogations impossibles à lever par la seule modélisation quasi-statique. Cette simulation permet de simuler le fonctionnement du procédé phase après phase et permet ainsi de tenir compte de l'évolution de la températures extérieure. Ainsi, la durée des différentes phases du cycle et l'évolution des niveaux de liquide dans chacun des composants ont pu être déterminées en fonction des conditions opératoires fluctuantes. Cet outil a également servi à simuler le contrôle-commande relativement complexe du procédé afin de proposer des méthodes permettant le démarrage du procédé, sa réinitialisation en cas de problème ou différentes actions correctrices permettant le fonctionnement du procédé quel que soit ses conditions de travail en évitant la dérive des niveaux de liquide notamment au sein des bouteilles séparatrices et des échangeurs de chaleur des cycles moteur et récepteur. Cette simulation a également permis de confirmer les performances données par la simulation quasi-statique, avec toutefois des hypothèses simplificatrices similaires.