

Remerciements

Au terme de ce modeste projet ; je tien à remercier le bon DIEU pour le courage qu'il m'a offert pour arriver au bout de mes études et réaliser ce travail.

Je tiens à remercier sincèrement mes encadreur Monsieur H.GUELLIL et Monsieur A.N.KORTI , pour avoir accepter de diriger ce travail et de m'avoir accompagner tout au long de sa réalisation avec beaucoup d'intérêt et de disponibilité ainsi pour leur gentillesse, leur spontanéité, l'aide, l'orientation, la guidance, leurs encouragements, et leurs critiques constructifs qui m'ont beaucoup aidé à apprécier ce travail et à mieux éclairer mes perspectives, et particulièrement pour la confiance qu'il m'a fait.

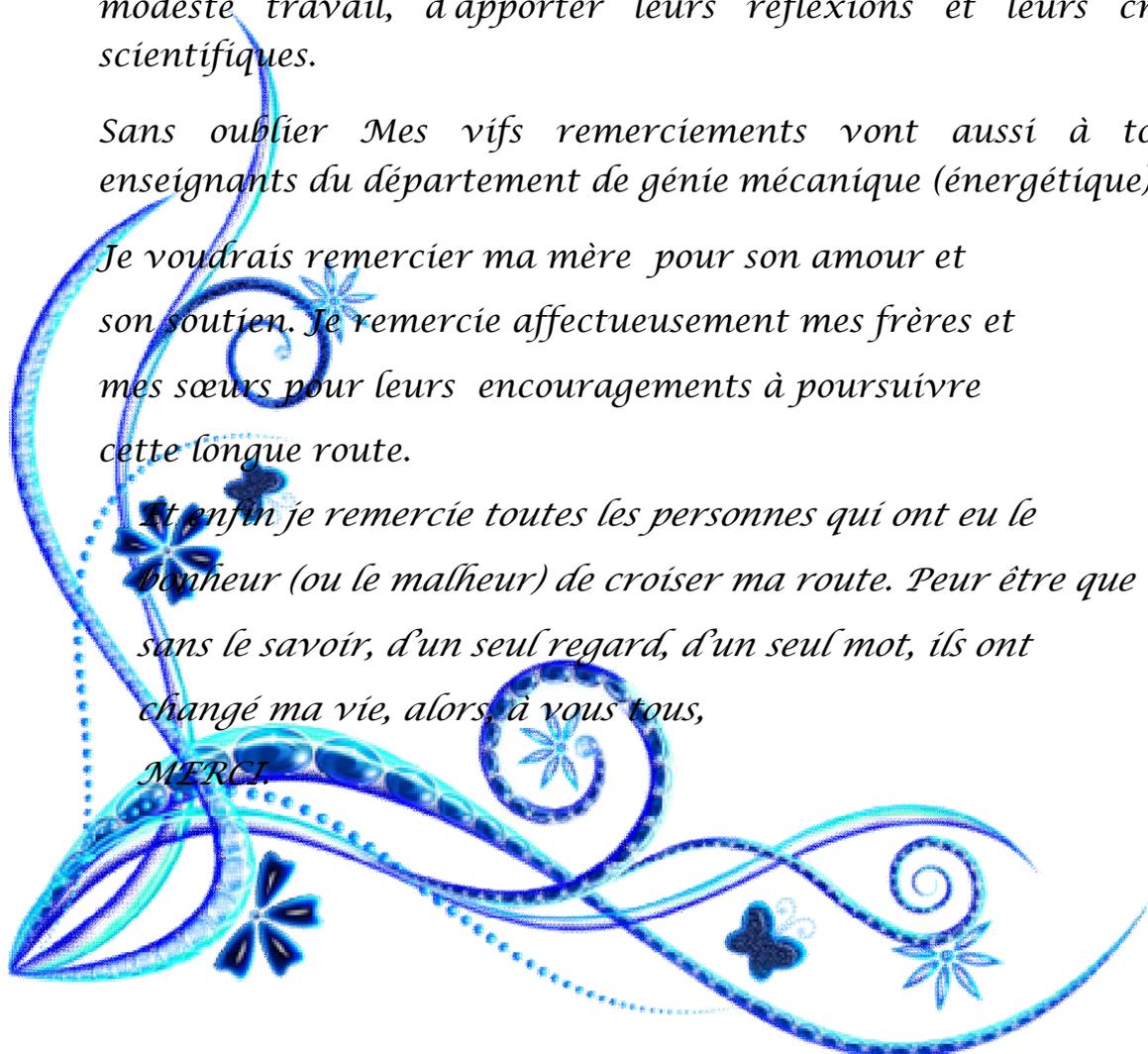
Notre respect aux membres de jury, Mr AZZI, Mr SAJM et Mme SAIB, qui me faisons l'honneur d'accepter et de juger ce modeste travail, d'apporter leurs réflexions et leurs critiques scientifiques.

Sans oublier Mes vifs remerciements vont aussi à tous les enseignants du département de génie mécanique (énergétique)

Je voudrais remercier ma mère pour son amour et son soutien. Je remercie affectueusement mes frères et mes sœurs pour leurs encouragements à poursuivre cette longue route.

Et enfin je remercie toutes les personnes qui ont eu le bonheur (ou le malheur) de croiser ma route. Peut être que sans le savoir, d'un seul regard, d'un seul mot, ils ont changé ma vie, alors, à vous tous,

MERCI.





Dédicace

Avec un grand cœur plein de chaleur, je dédie ce mémoire, aux êtres qui me sont les plus chers :

A la mémoire de mon père : à celui qui portait un grand cœur, à celui que je porte son nom avec fierté, à celui qui me manquait depuis l'enfance. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Ce travail est le fruit des sacrifices que vous avez consentis pour mon éducation et ma formation. J'espère que, du monde qui est le sein maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'une fille qui a toujours prié pour le salut de son âme. Puisse Dieu, le tout puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde !

A ma chérie maman à mon ange de la vie, au secret de mon sucs je dédié ce modeste travail à la personne, qui sans elle, je ne serai jamais arrivée à ce palier, celle qui m'a poussée, encouragée à aimer les études et qui ne cesse de la faire, à ma mère. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as pas cessé de me donner

À mes frères : Hocine et Lahcen.

À mes sœurs : Fatiha, Rabia, Naima, Yamina

Une dédicace spéciale à ma chère sœur Khadidja

A tous ceux, qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire de fin d'études.

A tous ceux qui me sont chères.

Khawla



Sommaire

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale1

CHAPITRE 1 : Stockage d'énergie thermique par MCP

1.1. Stockage thermique.....	4
1.2. Les différents types de stockage	5
1.2.1. Stockage sensible.....	5
1.2.2. Chaleur latente	8
1.2.3. Stockage thermochimique	12
1.2.4. Comparaison des systèmes de stockage	12
1.3. Matériaux à Changement de Phase	14
1.3.1. Critère de sélection d'un bon MCP	14
1.3.1.1. Propriétés thermophysiques.....	15
1.3.1.2. Propriétés cinétiques et chimiques	16
1.3.1.3. Propriété économiques	17
1.3.2. Classification des matériaux a changement de phase.....	18
1.3.2.1. Les composés organiques	19
1.3.2.2. Les composés organiques non-paraffiniques.....	26
1.3.2.3. Les composés inorganiques	26
1.3.2.4. Les eutectiques	27

CHAPITRE 2 : Présentation générale de Labview

2.1. Introduction.....	29
2.2. Les instruments virtuels	29
2.2.1. Les composantes d'un instrument virtuel.....	30
2.2.1.1. La face-avant	30
2.2.1.2. Diagramme	31
2.2.1.3. Création de VIs et de sous-VIs	31
2.3. Environnement LabVIEW	32

2.3.1.	Palette des commandes	32
2.3.2.	Palette des fonctions	32
2.3.3.	Palette d'outils	33
2.3.4.	Construction de la face-avant	34
2.3.4.1.	Commandes et indicateurs de la face-avant	35
2.3.4.2.	Graphes et graphes déroulants	37
2.3.5.	Construction du diagramme.....	37
2.3.6.	Boucles et structures	38

CHAPITRE 3 : Présentation de l'interface Labview

3.1.	Présentation de l'interface.....	42
3.2.	Développement d'instruments virtuels	43
3.2.1.	Boucle While	43
3.2.2.	Contrôle de la vitesse.....	45
3.2.3.	Auto-indexation de boucle.....	45
3.2.3.1.	Registres à décalage.....	46
3.2.4.	Les conditions initiales	47
3.2.5.	Graphes	48
3.2.5.1.	Graphes déroulants	49
3.3.	Communication d'Acquisition de données avec des instruments (Windows).....	50
3.3.1.	Acquisition d'un signal dans NI-DAQmx	50
3.3.1.1.	Création d'une tâche NI-DAQmx.....	50
3.4.	Enregistrement de données dans un fichier Excel	53

CHAPITRE 4 : Matériels et méthodes

4.1.	Introduction :.....	56
4.2.	Description de l'installation :.....	56
4.3.	Matériau à Changement de Phase.....	57
4.3.1	Réalisation du compartiment stockeur	57
4.3.2	Résistance chauffante	58
4.3.3	Positionnement des thermocouples	58
4.3.4	Isolation de la cavité thermique	59

4.3.5	Matériau à changement de phase (MCP)	59
4.3.6	Chaine d'acquisition.....	61
4.4.	Expériences Menées.....	61
4.4.1	Paraffine seule	61
4.4.2	Amélioration de la conductivité thermique de la paraffine :	62
4.4.2.1	Utilisation d'une grille en zamak	62
4.4.2.2	Utilisation d'une plaque perforée.....	63

CHAPITRE 5: Résultats et Discussions

5.1.	Introduction.....	65
5.2.	Evolution de la fusion de la paraffine pendant la phase de fusion.....	65
5.2.1.	Evolution du front de fusion.....	65
5.2.2.	Evolution de la température de la paraffine.....	68
5.3.	Amélioration de la conductivité thermique effective de la paraffine	69
5.3.1.	Grille en Zamak	69
5.3.1.1.	Evolution du front de fusion.....	69
5.3.1.2.	Evolution de la température du MCP	73
5.3.2.	Plaques perforées en aluminium.....	74
5.3.2.1.	Evolution de la fusion de la paraffine	74
5.3.2.2.	Evolution de la température du MCP	77
	Conclusion générale.....	79

CHAPITRE 1 : Stockage d'énergie thermique par MCP

Fig. 1.1. Principales techniques de stockage de l'énergie thermique.....	4
Fig. 1.2. Diagramme de changement d'état d'un matériau	8
Fig. 1.3. Comparaison entre un système de stockage latent et sensible.....	9
Fig. 1.4. Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état .	10
Fig. 1.5. Variation de l'enthalpie spécifique en fonction de la température (a) pour un corps pur (b) pour un mélange.	11
Fig. 1.6. Classification des matériaux à changement de phase	18
Fig. 1.7. Les composés organiques	19
Fig. 1.8. Les composés inorganiques	26

CHAPITRE 2 : Présentation générale de Labview

Fig. 2.1. Exemple de face-avant.....	30
Fig. 2.2. Exemple de diagramme.....	31
Fig. 2.3. Création de sous VI.....	31
Fig. 2.4. Palette de controls	32
Fig. 2.5. Palette de fonctions	33
Fig. 2.6. Palettes d'outils.....	33
Fig. 2.7. Caractères communs des deux fenêtres	34
Fig. 2.8. Palette de boutons spécifiques au mode d'édition	35
Fig. 2.9. Palette des commandes et indicateurs modernes et classiques	36
Fig. 2.10. Palette de commandes et indicateurs système	37
Fig. 2.11. Palette des graphes.....	37
Fig. 2.12. Outils spécifiques au diagramme	38
Fig. 2.13. Boucle for.....	39
Fig. 2.14. Boucle while	39
Fig. 2.15. Structure condition.....	40
Fig. 2.16. Structure séquence	40
Fig. 2.17. Structure évènement.....	40

CHAPITRE 3 : Présentation de l'interface Labview

Fig. 3.1. Face avant du Labview	42
Fig. 3.2. Boucle while	43
Fig. 3.3. Terminal conditionnelle hors la boucle.....	44
Fig. 3.4. Vitesse d'exécution	45
Fig. 3.5. Lecture des données	47
Fig. 3.6. Palette des waveforms.....	48
Fig. 3.7. Analog wavefrom.....	48
Fig. 3.8. Exemple de graphe.....	49
Fig. 3.9. Graphe déroulant.....	49

Fig. 3.10. Exemple de chaîne d'acquisition des données	50
Fig. 3.11. Palette express.....	51
Fig. 3.12. Palette input	51
Fig. 3.13. Terminal de VI Express	52
Fig. 3.14. Définition des voies physiques de la carte interface d'acquisition	53
Fig. 3.15. Palette de file I/O	54

CHAPITRE 4 : Matériels et méthodes

Fig. 4.1. Différents matériel et accessoire de l'installation.....	56
Fig. 4.2a. Pliage et soudage des tôles en Cu	57
Fig. 4.3b. Assemblage des tôles en cuivre avec la cavité thermique en verre	57
Fig. 4.4. Montage et positionnement des capteurs à l'intérieur de la cavité thermique.....	58
Fig. 4.5. Isolation de la cavité thermique	59
Fig. 4.6a. Paraffine utilisée comme MCP.	60
Fig. 4.6b. Remplissage de MCP dans la cavité thermique.....	60
Fig. 4.7. Raccordement des thermocouples avec la chaîne d'acquisition NI.....	61
Fig. 4.8. Paraffine seule.....	62
Fig. 4.9. Mesure du volume de la grille et son emplacement dans la cavité thermique.....	62
Fig. 4.10a. Immersion des plaques.....	63
Fig. 4.10b. Immersion des plaques en cuivre.....	63

CHAPITRE 5 : Résultats et Discussions

Fig. 5.1. Evolution de la fusion de la paraffine	66
Fig. 5.2. Evolution temporelle de la position et la forme de l'interface solide-liquide.....	67
Fig. 5.3 . Evolution de la fraction volumique de liquide.....	67
Fig. 5.4. Évolution temporelle de la température de la paraffine.....	68
Fig. 5.5. Evolution de la fusion de la paraffine avec grille en Zamak	70
Fig. 5.6. Evolution du front de fusion de la paraffine avec et sans grille en Zamak.....	71
Fig. 5.7. Evolution de la fraction volumique de liquide.....	71
Fig. 5.8. Evolution de la fraction volumique de la paraffine avec et sans grille en Zamak .	72
Fig. 5.9. Evolution de la température de la paraffine avec et sans grille	73
Fig. 5.10. Evolution de la fusion de la paraffine avec grille en l'aluminium.....	74
Fig. 5.11. Evolution du front de fusion de la paraffine avec et sans grille d'aluminium....	75
Fig. 5.12. Evolution de la fraction volumique de liquide.....	76
Fig. 5.13. Evolution fraction liquide de la paraffine seule et avec l'Aluminium.....	76
Fig. 5.14. Evolution de la température de la paraffine avec et sans aluminium	77

Tab. 1.1. Matériaux pour le stockage thermique à chaleur sensible (Gil 2010).....	7
Tab. 1.2. Comparaison des différents types de stockage en fonction de leur densité énergétique,	14
Tab. 1.3. Propriétés thermophysiques de quelques paraffines	21
Tab. 4.1 . Propriétés thermophysiques du Tétracosane	60
Tab. 5.1. Tableau récapitulatif.....	78

Chapitre 1

Stockage d'énergie thermique
par MCP

Chapitre 1

Stockage d'énergie thermique par MCP

Sommaire

1.1. Stockage thermique.....	4
1.2. Les différents types de stockage.....	5
1.2.1. Stockage sensible.....	5
1.2.2. Chaleur latente.....	8
1.2.3. Stockage thermochimique.....	12
1.2.4. Comparaison des systèmes de stockage.....	12
1.3. Matériaux à Changement de Phase.....	14
1.3.1. Critère de sélection d'un bon MCP.....	14
1.3.1.1. Propriétés thermophysiques.....	15
1.3.1.2. Propriétés cinétiques et chimiques.....	16
1.3.1.3. Propriété économiques.....	17
1.3.2. Classification des matériaux a changement de phase.....	18
1.3.2.1. Les composés organiques.....	19
1.3.2.2. Les composés organiques non-paraffiniques.....	26
1.3.2.3. Les composés inorganiques.....	26
1.3.2.4. Les eutectiques.....	27

1.1. Stockage thermique

L'énergie thermique est la somme du potentiel et des énergies cinétiques des atomes et des molécules qui composent la substance. À la suite de vibrations atomiques et moléculaires, l'énergie thermique se produit dans la substance. Ainsi l'énergie thermique peut être stockée comme un changement de l'énergie interne d'un matériau en tant que chaleur sensible, chaleur latente et chaleur thermochimique, ou une combinaison de ces derniers. Un aperçu des principales techniques de stockage de l'énergie thermique est illustré à la figure 1.1 [1].

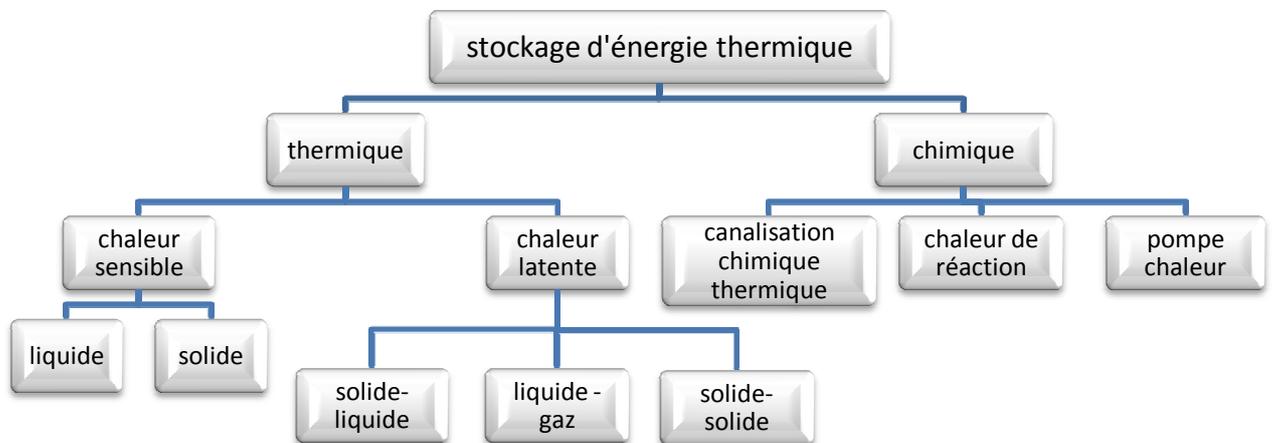


Fig. 1.1. Principales techniques de stockage de l'énergie thermique [2]

Ahmed Maha (2005) [3], a longuement discuté sur les applications usuelles du stockage thermique, tout en montrant que :

- La récupération de la chaleur perdue dans les installations industrielles pendant la durée de leur fonctionnement et l'utilisation ultérieurement dans d'autres besoins.
- Le stockage sous forme thermique du surplus d'énergie électrique produite pendant les heures creuses pour couvrir les besoins qui nécessitent le recours de la consommation d'énergie durant les heures de pointes où les appels en puissance qui peuvent dépasser les capacités des centrales.

- Le stockage de l'énergie frigorifique en froid industriel et en climatisation quand la capacité libre de production de froid en heures creuses, peut être utilisée pour couvrir les besoins lors de pointes de consommation, comme dans le cas de la gestion de l'énergie électrique.
- Le stockage de l'énergie produit dans les systèmes solaires passifs pendant le jour ensoleillé et l'utiliser pendant la nuit ou dans une autre période.
- Le refroidissement des circuits électroniques ou le fonctionnement en transitoire des circuits électronique, nécessite généralement des puissances de refroidissement bien supérieures aux puissances nominales qui conduisent à sur dimensionner les circuits, leurs alimentations et leur système de refroidissement.

L'utilisation d'un stockage d'énergie associé à ces circuits permet de faire face aux appels transitoires de puissance sans ce surdimensionnement.

- La gestion du confort thermique dans les bâtiments qui dépend non seulement de la température et de l'humidité de l'air ambiant, mais encore des températures des parois. C'est une des raisons pour laquelle le stockage par chaleur latente est attractif.

1.2. Les différents types de stockage

1.2.1. Stockage sensible

Parmi l'ensemble des techniques d'accumulation de chaleur, le stockage par chaleur sensible est la solution la plus ancienne pour stocker la chaleur. Il s'agit d'apporter de la chaleur à un matériau pour faire évoluer sa température sans changement d'état. Le matériau est caractérisé par sa capacité calorifique, notée C_p et exprimée en $J/(kg.K)$, qui traduit sa capacité à emmagasiner de la chaleur (J) par unité de masse (kg) et de température (K). L'énergie stockée répond alors à la formule suivante [4] :

$$E = m \Delta H = m C_p \Delta T \quad (1)$$

Avec m la masse du matériau soumis au changement de température, H l'enthalpie massique, C_p la capacité calorifique du matériau, et ΔT la différence de température de fonctionnement du stockage ($T_{chaud} - T_{froid}$).

Le stockage sensible se retrouve régulièrement dans notre vie courante. Il est possible de stocker du froid, comme dans un réfrigérateur par exemple, ou du chaud, comme dans un ballon d'eau chaude sanitaire domestique. La géothermie est un domaine qui utilise l'énergie du sol qui reste quasiment à la même température toute l'année. La terre est alors un matériau de stockage utile et disponible. On y puise tantôt de la chaleur en hiver et tantôt de la fraîcheur en été. Ainsi, le stockage « actif » se distingue du stockage « passif » par le déplacement du matériau de stockage.

Il est distingué visuellement dans le CSP (Concentrated Solar Power), car il est généralement doté de deux gros réservoirs (l'un froid et l'autre chaud), dans lequel le fluide de transfert circule. La géothermie est un exemple de stockage passif. Le stockage que l'on souhaite développer pour la protection du récepteur est aussi de type passif.

Dans le stockage thermique à hautes températures, Gil *et al.* (Gil 2010) [12], proposent une liste très complète de matériaux permettant le stockage thermique en chaleur sensible dans le cas de la production d'énergie à grande échelle. Une sélection de quelques-uns de ces matériaux est indiquée dans le Tableau 1.1 :

Tab. 1.1. Matériaux pour le stockage thermique à chaleur sensible (Gil 2010)

Matériau	Température (°C)		Etat	Densité (kg/m ³)	Conductivité thermique (W/(m.K))	Capacité thermique (J/kg.K)	Capacité thermique volumique (kWh/m ³)	Coût US\$/kg	Coût US\$/kWh
	Basse	Haute							
Béton armé HT	200	400	Sol	2500	1,5	850	118	0,05	1
NaCl (sel)	200	500	Sol	2160	7	850	153	0,15	1,5
Fonte	200	400	Sol	7200	37	560	224	1	32
Acier trempé	200	700	Sol	7800	40	600	650	5	60
Briques réfractaires	200	1200	Sol	3500	5	1150	958	2	6
Cofalit	200	1200	Sol	3000	2	1000	833	-	-
Eau liquide	0	100	Liq	1000	0,6	1180	32	-	-
HITEC sel solaire	120	133	Liq	-	-	-	-	-	-
Sels fondus solaires	265	565	Liq	1870	0,52	1600	250	0,50	3,7
Huile minérale	200	300	Liq	770	0,12	2600	55	0,3	4,2
Sels de carbonate	450	850	Liq	2100	2	2000	420	1,9	8,9
Vapeur surchauffée	100	300	Gaz	0,4	0,04	2	4x10 ⁻⁵	-	-

Le tableau 1.1, montre qu'il est possible de stocker la chaleur sensible dans un matériau solide, liquide, ou gazeux. La vapeur surchauffée, unique gaz présenté, est un très mauvais matériau conducteur et stockeur de la chaleur en plus d'être très corrosif sous pression. En revanche les huiles minérales ont la meilleure capacité de stockage. Les sels fondus ont l'avantage d'être bon marché et présentent une conductivité thermique et une capacité thermique acceptable comparés aux métaux et bétons. Cela explique leur large utilisation dans les centrales solaires commerciales actuelles. Pour les températures élevées (supérieures à 600°C), les

bétons réfractaires, le Cofalit (déchets industriels rendus inertes par vitrification), et les sels de carbonates sont des matériaux candidats.

Le stockage thermique par chaleur sensible est donc très facile à mettre en œuvre mais requiert des volumes et des masses importants de matériau afin de stocker une grande quantité d'énergie. Pour s'affranchir des dimensions importantes, une autre solution est de stocker la chaleur sous une gamme de température très grande conformément à la relation 1 [4]

1.2.2. Chaleur latente

L'intérêt de la chaleur sensible est de pouvoir stocker directement le fluide caloporteur dans un grand volume. Pour stocker la chaleur sensible de façon indirecte, un fort gradient de température est nécessaire. Une solution pour gagner de la place et réduire l'intervalle de température du stockage est d'utiliser la chaleur latente. La chaleur est stockée dans une gamme de température autour du point de fusion ou de vaporisation d'un matériau appelé matériau à changement de phase (MCP). Plus la gamme de température est petite, plus la part d'énergie stockée par le changement d'état est importante. Le stockage est efficace à la condition que l'ensemble du matériau change d'état. Dans la littérature, les systèmes de stockage à chaleur latente, de grande échelle et à haute température sont rares voire inexistants. Les PCM sont souvent des matériaux chers (Tableau 1.1) et peu disponibles.

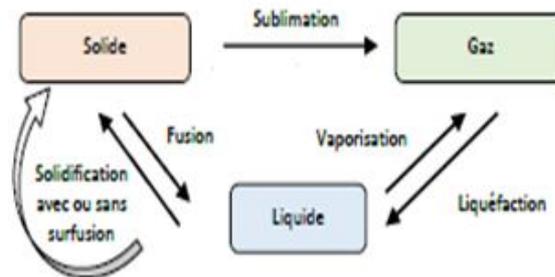


Fig. 1.2. Diagramme de changement d'état d'un matériau

Compte tenu de la faible quantité nécessaire pour parvenir à protéger le récepteur, le stockage latent est donc intéressant dans notre cas. Les diverses

transformations existantes sont représentées sur la Figure 1.2. Chaque transformation est réalisée à température constante.

Chaque transformation s'accompagne d'un changement de volume non négligeable, surtout lorsque le gaz est impliqué, et d'une absorption ou libération de chaleur (liée à la création ou la fracture des liaisons moléculaires). La condensation et la vaporisation sont souvent utilisées dans les cycles thermodynamiques (réfrigérateur, pompes à chaleur) grâce à un fluide frigorigène qui passe tantôt à l'état liquide pour évacuer de la chaleur et tantôt à l'état gazeux pour accumuler de la chaleur. Il existe des matériaux à changement de phase de différents types et des températures de changement d'état pour toutes les applications. La quantité de chaleur stockée et restituée, dépend de la masse du matériau selon l'équation (2) de référence [4]:

$$E_{\text{latente}} = m\Delta h \quad (2)$$

Cette quantité de chaleur stockée dans un système latent peut être représentée comme suit sur le graphe température – énergie de la Figure 1.3.

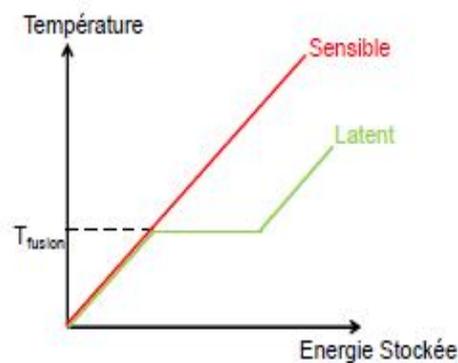


Fig. 1.3. Comparaison entre un système de stockage latent et sensible [6].

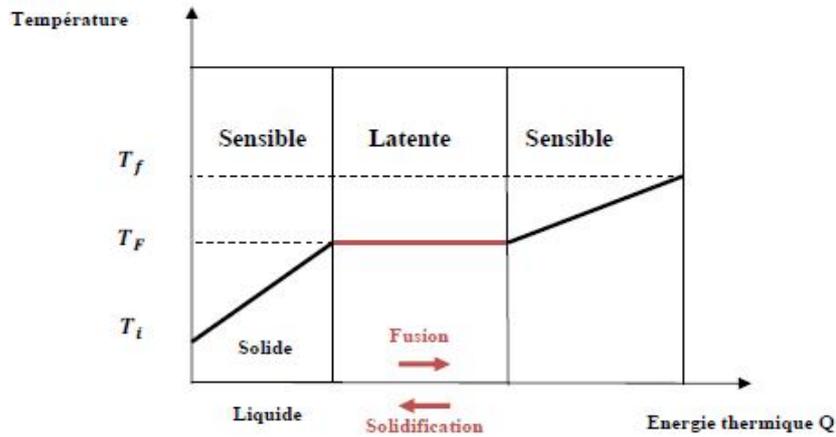


Fig. 1.4. Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état

Lorsque le matériau est chauffé, il accumule d'abord une quantité d'énergie sensible lui permettant d'atteindre la température de changement de phase. A ce stade, l'énergie apportée au matériau cesse de le chauffer et est utilisée à la place pour accomplir le changement de phase. La chaleur est stockée de façon isotherme à condition que le corps soit pur sous forme de chaleur latente. Une fois que la transformation est complète, la température augmente de nouveau proportionnellement à l'énergie apportée jusqu'à atteindre la température de la source de chaleur. Il est donc impossible de ne stocker que la chaleur latente puisque pour arriver au point de changement de phase, le matériau doit subir une montée en température, stockant inévitablement une part d'énergie sensible. La quantité d'énergie stockée [5] peut être exprimée pour le cas de la transition solide-liquide selon l'équation (3) :

$$Q = \int_{initial}^{fusion} m \cdot C_{ps} \cdot dT + m \Delta H_{sl} + \int_{fusion}^{final} m \cdot C_{pl} \cdot dT \quad (3)$$

Si l'on représente l'enthalpie spécifique en fonction de la température, on obtient donc la courbe (a) de la figure 1.5. On remarque la discontinuité due au changement d'état (pas de variation de température).

Dans le cas d'un mélange (alliage...), la variation d'enthalpie ne présente plus de discontinuité (courbe (b) de la figure 5),(Ahmed.M 2004) [7], sauf dans le cas où le composé est défini avec une fusion ou une solidification congruente[1].

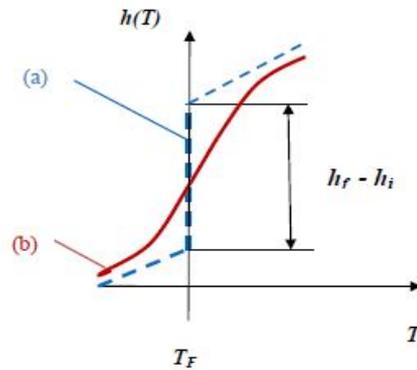


Fig. 1.5. Variation de l'enthalpie spécifique en fonction de la température (a) pour un corps pur (b) pour un mélange.

Les matériaux utilisés pour le stockage thermique latent sont connus sous le nom de Matériaux à Changement de Phase (MCP). Les MCP peuvent être employés pour leur transition solide-solide, solide-liquide ou liquide-gaz. La transition solide-solide a été envisagée pour remplacer l'encapsulation des MCP utilisée en batch dans certains containers de stockage. Cette transition est simple à gérer dans la mesure où il n'y a pas ou peu d'expansion volumique, ce qui limite les risques de fuites et de surpression. Cependant, peu de matériaux ont été identifiés parfois, car la chaleur latente de transition solide-solide est trop faible devant celle de la transition solide-liquide, ou parfois, le matériau n'est pas stable thermiquement.

Les transformations liquide-gaz sont attractives car elles présentent la plus grande chaleur latente. Néanmoins, l'énorme changement de volume associé à l'évaporation du liquide rend le stockage complexe et souvent inutilisable. C'est pourquoi cette transition est écartée des systèmes de stockage latent.

Bien que la chaleur latente de fusion soit plus faible que la chaleur latente d'évaporation, la transition solide-liquide est la plus prometteuse puisqu'elle permet de limiter l'expansion volumique et ainsi l'augmentation de pression due au changement de phase. Lors d'une fusion, il faut compter une augmentation

volumique d'environ 10 % [6]. Si un volume d'expansion est prévu dans le container, alors le solide comme le liquide peuvent être contenus dans le système de stockage limitant ainsi la pression subie par le réservoir [5].

1.2.3. Stockage thermochimique

La troisième façon de stocker l'énergie thermique consiste à l'utilisation de l'énergie endothermique des réactions chimiques réversibles. La chaleur de réaction qui est stockée est souvent associée à la dissociation des réactifs chimiques en deux composants. Tout où partie de cette chaleur peut être récupérée plus tard lorsque la réaction de synthèse a lieu.



Avec

A : réactif solide ou liquide

ΔHr : chaleur de réaction en J/mol

B et C : produits sous forme gaz, liquide ou solide

Une condition pour que le stockage ait une taille suffisamment petite est que les réactifs soient plutôt solides ou liquides. Les produits obtenus peuvent être indépendamment des gaz, liquides ou solides. Lorsque la réaction se fait avec un gaz, le système de stockage peut se présenter sous la forme d'un réacteur à lit fluidisé. Par ailleurs, dans ce type de stockage, les produits obtenus sont stockés pour être utilisés ultérieurement et ce système est propice au stockage inter-saisonnier [5].

1.2.4. Comparaison des systèmes de stockage

Tous les systèmes de stockage sont utilisés selon trois étapes majeures : la charge, le stockage et la décharge. Un grand nombre de moyens de stockage peuvent être identifiés selon leurs propriétés, leur température d'utilisation, le type de stockage souhaité et le domaine d'application envisagé. Les stockages ont différents potentiels comme le décrit H. Mehling et L.F. Cabeza [6].

Pour sélectionner le type de stockage, il conviendra de regarder pour quelle application il sera mis en œuvre. Par exemple, les systèmes latents et sensibles seront plutôt utilisés comme stockage tampon pour lisser la production ou différer l'utilisation de l'énergie. Alors que les stockages thermochimiques seront plus adaptés à un stockage de long terme ou inter-saisonnier qui emmagasinerait la chaleur produite en excès par certaines installations d'été et la restituer en hiver.

Par ailleurs, chaque système de stockage a un degré de maturité différent. Les systèmes de stockage sensible ont été expérimentés dans de nombreux prototypes ou à l'échelle d'une centrale solaire, comme le détaillent Medrano et al. [8]. Les Matériaux à Changement de Phase sont mis en œuvre dans des applications pilotes qui émergent peu à peu dans le domaine du stockage thermique. On peut notamment citer l'exemple du projet ITES [35] qui met en place un prototype de stockage latent utilisant du NaNO_3 , combiné à un étage sensible pour une centrale solaire à génération directe de vapeur [9]. De nombreux efforts de recherche perdurent cependant pour déployer de tels systèmes à échelle industrielle. Par ailleurs, par sa grande densité énergétique, le stockage thermochimique est prometteur mais n'est pour l'instant envisagé qu'à l'échelle du laboratoire étant donné la complexité de mise en œuvre. De nombreuses recherches sont en cours pour développer de tels systèmes.

Les densités énergétiques (la quantité d'énergie stockable par unité de volume) obtenues et les températures de fonctionnement de chaque système de stockage thermique de quelques matériaux [5] sont représentées sur le tableau 1.2.

Tab. 1.2. Comparaison des différents types de stockage en fonction de leur densité énergétique, [10-11]

Stockage sensible	Température (°C)		Capacité calorifique Cp (kJ/kg.K)	Masse volumique ρ (kg/ m ³)	Densité énergétique (kWh/m ³)
	Froid	Chaud			
Sable/roche/huile minérale	200	300	1.3	1700	61
Béton renforcé	200	300	0.85	2200	52
Huile minérale	200	300	2.6	770	56
Eau	20	80	4.18	1000	70
Nitrates de sels fondus	250	350	1.5	1825	76
Stockage latent	Température de fusion T_{fusion} (°C)		Chaleur latente Δh_{S-L} (kJ/kg)	Masse volumique ρ (kg/ m ³)	Densité énergétique (kWh/m ³)
Acide maléique	131-140		235	1590	103
Xylitol	95		232	1500	97
Erythritol	118		340	1450	137
MgCl ₂ .6H ₂ O	117		165	1569	72
NaNO ₃	307		172	2260	108
Stockage thermochimique	Température de réaction (°C)		Enthalpie de réaction ΔH_r (kJ/mol)		Densité énergétique (kWh/m ³)
	Charge	Décharge			
MgH ₂ + $\Delta H_r \leftrightarrow$ Mg + H ₂	380	230	-75		430
CaCO ₃ + $\Delta H_r \leftrightarrow$ CaO + CO ₂	700	650	-178		110
MgH ₂ + $\Delta H_r \leftrightarrow$ Mg + H ₂	450	25-400	-94.6 (charge) 64.8(décharge)		300

1.3. Matériaux à Changement de Phase

1.3.1. Critère de sélection d'un bon MCP

La sélection d'un MCP nécessite de se poser les bonnes questions quant à l'application et l'implantation du système de stockage futur. Une réflexion et analyse autour de la densité de stockage souhaitée, des puissances de charge et de

décharge mais aussi des critères économiques et environnementaux sont à entreprendre pour sélectionner le meilleur MCP. Plusieurs méthodes ont été proposées par différents auteurs afin de choisir au mieux un matériau dans une application spécifique [13-14]. Les MCP ne peuvent être utilisés comme matériaux de stockage que lorsqu'ils possèdent certaines propriétés *thermophysiques, cinétiques et chimiques, économiques et propriétés mécaniques*.

1.3.1.1. Propriétés thermophysiques

Il existe un grand nombre de matériaux qui peuvent être identifiés comme MCP, du point de vue de la température de fusion et de la chaleur latente.

- Les propriétés thermiques idéales sont comme suit [15;14] :
 - Le point de fusion/solidification se situe dans la plage de fonctionnement du procédé.
 - Le MCP a une grande chaleur latente de fusion afin qu'une petite quantité de matériau stocke une grande quantité d'énergie. Cette valeur est essentielle pour obtenir une grande densité énergétique de stockage exprimée en J/m^3 (kWh/m^3) ou J/kg (kWh/kg).
 - Une capacité calorifique élevée fournit un effet supplémentaire de stockage de chaleur sensible.
 - Le MCP présente une grande conductivité thermique, de sorte que le gradient de température entre le fluide caloporteur et la température de fusion est faible. Cette valeur est déterminante quant à la puissance échangée dans le système de stockage aussi bien en charge qu'en décharge. Pour la majorité des MCP, la valeur de la conductivité thermique ne dépasse cependant pas $0.5 W/(m.K)$
- Les propriétés physiques idéales sont comme suit [15;14] :
 - La densité du MCP est élevée, afin que la densité énergétique soit élevée, ce qui permet de réduire les volumes de stockage.
 - L'expansion volumique lors du changement de phase est faible afin de limiter les surpressions et les risques de fuite dans le réservoir.

L'expansion volumique est souvent de l'ordre de 10 % pour les MCP. Cette expansion volumique peut cependant être favorable aux transferts thermiques, notamment à la charge.

- La pression de vapeur saturante doit être faible pour limiter les risques de vaporisation. En effet, si la pression de vapeur saturante est trop élevée, un ciel gazeux en surpression devra être mis en place dans le réservoir de stockage pour éviter la perte du produit par vaporisation.
- Le produit présente une fusion/solidification congruente : les différentes phases présentent un équilibre favorable et ne se séparent pas au fur et à mesure des cycles, ce point est sensible pour les hydrates de sels.

1.3.1.2. Propriétés cinétiques et chimiques

- Les propriétés cinétiques idéales sont comme suit [15;14] :
 - Le matériau ne présente pas de surfusion pour que la chaleur stockée puisse être restituée à la même température que la température de stockage. La surfusion est la capacité du MCP à descendre sous le point de cristallisation tout en restant sous forme liquide. Il s'agit d'un état métastable qui est rompu soit par une perturbation extérieure (choc, impureté), soit par abaissement de la température jusqu'au point de nucléation, c'est-à-dire lorsque le premier germe de solide apparaît. Ainsi, si cette surfusion est assez importante, la chaleur est restituée à une température plus faible que la température de stockage. Il est remarqué dans la littérature qu'un degré de surfusion de 5-10 °C peut aller jusqu'à empêcher la décharge du système de stockage [14].
 - Par ailleurs, la vitesse de cristallisation est déterminante pour la puissance du système de stockage. Si le produit est long à cristalliser, il rendra sa chaleur très lentement et limitera la puissance échangée avec le fluide caloporteur.

- Les propriétés chimiques idéales sont comme suit [15;14]:
 - La stabilité chimique à long terme permet le cyclage des MCP, sans dégradation chimique du matériau. Pour un système de stockage, on appelle « cyclage », la succession des charges et des décharges.
 - Le MCP n'est ni toxique, ni explosif, ni dangereux pour l'environnement.
 - Son potentiel de corrosion est faible et il est compatible avec les matériaux utilisés dans la construction de l'échangeur (acier, inox, cuivre, aluminium etc....) ainsi qu'avec le fluide caloporteur (vapeur, eau, huile thermique etc....)

1.3.1.3. Propriété économiques

Le MCP peut présenter des caractéristiques thermophysiques et chimiques idéales, il doit aussi présenter des caractéristiques économiques intéressantes pour rivaliser avec le stockage sensible dans l'industrie. Les caractéristiques économiques idéales sont représentées comme suit [15;14] :

- Le coût du MCP est faible.
- Il est disponible et abondant.
- Son coût de fabrication est moindre et n'impacte pas l'environnement. Idéalement, le MCP provient d'un procédé bio-sourcé et est un co-produit d'une unité de production encore non valorisé.

1.3.2. Classification des matériaux a changement de phase

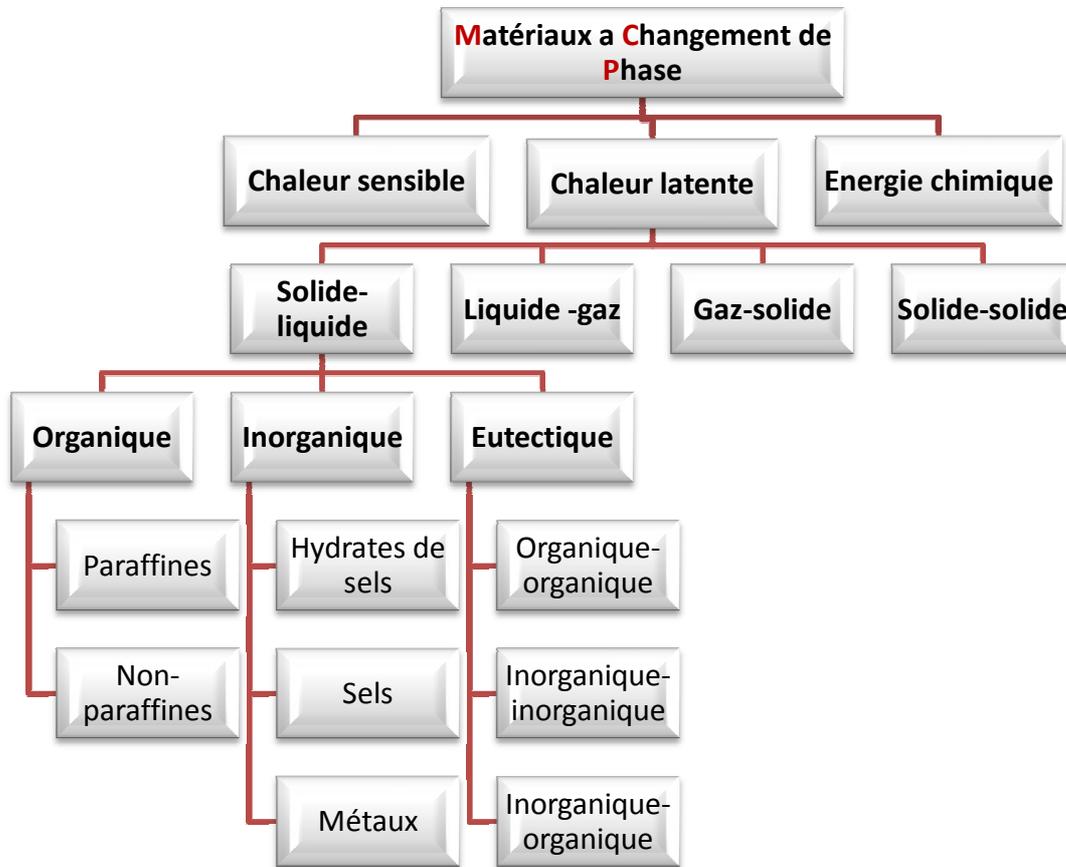


Fig. 1.6. Classification des matériaux à changement de phase

Il y a un grand nombre de substances chimiques qui peuvent être identifiés comme MCP du point de vue de leur température de fusion et de leur chaleur latente de fusion. Cependant, excepté le point de fusion des substances situées dans la plage de température de fonctionnement souhaitée, une majorité de ces substances ne répondent pas aux autres critères exigés pour servir de supports appropriés à un stockage de chaleur.

En effet, aucun matériau ne peut avoir intrinsèquement toutes les propriétés requises pour un support de stockage thermique idéal. Aussi ces matériaux sont employés tout en recherchant les voies et moyens qui permettent d'éviter ou de compenser les inconvénients qu'ils présentent par des techniques appropriés

adaptées à chaque application. Par exemple, des ailettes métalliques ont été employées pour augmenter la conductivité thermique des MCP, la surfusion peut être évitée par addition d'un agent de nucléation dans le matériel de stockage, et la fusion non congruente est empêchée en ajoutant dans le MCP un agent épaississant ou un gélifiant approprié.

On peut classer les MCP couramment utilisés selon trois catégories :

- Les composés organiques: paraffines, corps non-paraffiniques, polyalcools.
- Les composés inorganiques: hydrates salins, sels, métaux et alliages.
- Les eutectiques de corps inorganiques et/ou organiques.

Les composés organiques et les composés inorganiques présentant des propriétés thermiques et chimiques très différentes qui affectent significativement la conception d'un système de stockage thermique pour une application donnée et qui sont détaillés dans ce qui suit [1].

1.3.2.1. Les composés organiques

On trouve dans les composés organiques principalement les paraffines, les alcools de sucre, les acides gras et d'autres composés moins utilisés comme les cétones ou les esters.

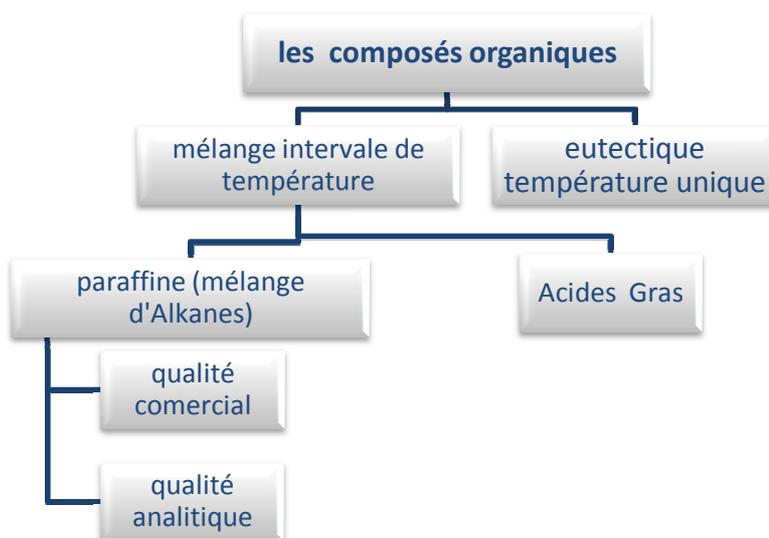


Fig. 1.7. Les composés organiques [19]

A. Paraffine

Les paraffines sont une famille d'hydrocarbures saturés de formule brute C_nH_{2n+2} , aux propriétés très similaires. Parmi les MCP solide-liquide, elles sont les plus utilisées, surtout dans les applications à basse température (de -10 à 100 °C) car elles offrent l'avantage d'avoir une chaleur latente qui dépend de la masse molaire et des températures de changement de phase variables, donnant de la flexibilité pour choisir le MCP approprié à chaque application [5].

Les paraffines pures uniquement constituées d'alcane peuvent être caractérisées par leur point de fusion. Cependant les paraffines existent généralement sous forme de mélange, si bien qu'il n'est pas possible de parler de point de fusion mais plutôt d'une zone de fusion. Pour des applications de stockage thermique les n-paraffines sont les plus utilisées à cause de leur capacité de stockage plus importante.

Les paraffines intéressantes pour le stockage thermique sont celles qui sont sous forme solide aux températures usuelles et elles sont qualifiées de (cires paraffinées)

Le point de fusion des alcanes augmente avec le nombre croissant d'atomes de carbone. Mises à part certaines caractéristiques favorables des paraffines, telles que la fusion congruente et de bonnes propriétés de nucléation, elles montrent cependant certaines propriétés indésirables telles que :

- faibles conductivités thermiques
- sont incompatibles avec les récipients en plastique
- sont modérément inflammables

Tous ces effets indésirables peuvent être éliminés en partie en modifiant légèrement la cire et l'unité de stockage [1].

Il existe quelques méthodes développées pour augmenter la conductivité thermique. Une de ces méthodes est l'utilisation de graphites expansés [16, 17 et 1]. MMEHLING et coll. [18], ont signalé que le matériau composite PCM-graphite a une conductivité thermique 100 fois plus élevée que la paraffine pure. Certaines

paraffines sélectionnées sont indiquées dans le tableau 1.3 avec leur point de fusion et leur chaleur latente de fusion.

Tab. 1.3. Propriétés thermophysiques de quelques paraffines

Nombre d'Atomes de carbone	Point de Fusion (°c)	Chaleur latent de fusion (Kj/Kg)
14	5.5	228
15	10	205
16	16.7	237.1
17	21.7	213
18	28	244
19	32	222
20	36.7	246
21	40.2	200
22	44	249
23	47.5	232
24	50.6	255
25	49.4	238
26	56.3	256
27	58.8	236
28	61.6	253
29	63.4	240
30	65.4	251
31	68	242
32	69.5	170
33	73.9	168
34	75.9	169

Dans cette catégorie, on peut citer notamment les paraffines n-Hexadecane ($T_{\text{fusion}} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$), n-Nonacosane ($T_{\text{fusion}} = 63,4 \text{ }^\circ\text{C}$) ou encore le n-Triacontane ($T_{\text{fusion}} = 65,4 \text{ }^\circ\text{C}$) [20].

Avantages

En général, plus la longueur moyenne de la chaîne hydrocarbonée est élevée, plus la température de fusion et la chaleur latente sont grandes [21]. En utilisant cette relation, des mélanges de différentes paraffines peuvent être faits pour imaginer le MCP approprié à chaque cas [20]. Les paraffines ne montrent pas de tendance à la ségrégation des phases lors de leur transition et sont chimiquement stables. En effet, Hadjieva et al. [22] ont pu tester la robustesse de trois échantillons de paraffine pendant 900 cycles d'opération. A. Sharma et al. [14] affirme même que les propriétés des paraffines restent stables après 1500 cycles. Parmi les avantages des paraffines, on peut aussi citer [3] :

- ✓ L'enthalpie de fusion varie entre 180 et 230 kJ/kg. Cette valeur est grande par rapport à celle des autres matériaux organiques dont la capacité thermique massique est de 2.1 kJ/kg.K en tenant compte des deux valeurs (chaleur sensible et chaleur latente). On obtient une densité importante d'énergie de stockage. La capacité volumique de stockage de chaleur est 4-5 fois supérieure à celle de l'eau.
- ✓ La surfusion est négligeable. La pression de vapeur de fusion est faible même à des températures relativement hautes.
- ✓ Elles sont stables chimiquement mais, il faut les protéger de l'air pour éviter l'oxydation. En particulier, quand elles sont chaudes leur dégradation est similaire à celle des acides organiques.
- ✓ Il n'y a pas de ségrégation de phase.
- ✓ Les cires paraffiniques sont inertes chimiquement (d'où le nom paraffine) avec presque tous les matériaux (sauf certains plastiques ou le cuivre). Il y a donc peu de problèmes de corrosion avec les paraffines et leur conteneur. En

effet, les cires paraffiniques sont utilisées pour protéger les matériaux de la corrosion (vernis de protection dans l'industrie automobiles).

- ✓ Les cires paraffiniques ne présentent aucun danger écologique. Elles n'ont pas d'effets négatifs sur les plantes, les animaux, l'eau ou les micro-organismes. Elles sont non-toxiques et 100 % recyclables.
- ✓ Quelques paraffines commerciales sont adaptées aux applications de l'énergie solaire. Pour les applications dans les bâtiments, une paroi contenant 3 cm d'épaisseur de paraffine est l'équivalent thermique d'une paroi en béton de 40 cm.
- ✓ La masse volumique de la phase liquide des paraffines varie de 750 à 850 kg/m³ et celle de la phase solide est de 800 à 900 kg/m³. La dilatation volumique est donc environ 15% pendant le processus de changement de phase. On peut éviter ou au moins réduire ce problème par un conditionnement adapté.
- ✓ Les paraffines ordinaires sont souvent des mélanges d'hydrocarbures et ont un prix raisonnable. En fonction de leur composition, elles présentent des points de fusion variés. Par contre, les cires paraffiniques pures sont très coûteuses.

Inconvénients

- ✓ Les cires paraffiniques présentent une très faible conductivité thermique (0,18-0,25 W/m.K), la moitié de celle des hydrates salins. Cette propriété diminue le taux de stockage/déstockage de la chaleur pendant les cycles fusion/solidification. Cette faible conductivité thermique qui est habituellement un handicap, bien que dans le transport de nourriture elle soit un avantage, peut être compensée par une grande surface d'échange ou par un conditionnement adapté [3] (expansion volumique assez élevée $\approx 15\%$ [23]) et une densité peu importante (≈ 800 kg/m³ [20]). Par ailleurs, des précautions sont à prendre lors de l'utilisation des réservoirs en plastique, car

les paraffines ont tendance à s'infiltrer dans certains plastiques et à les ramollir [24].

- ✓ Les cires paraffiniques sont facilement inflammables [3].

B. Acides gras

Les acides gras sont caractérisés par la formule chimique $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$ et ont à peu près les mêmes propriétés thermophysiques que les paraffines. L'intérêt d'utiliser les acides gras comme MCP est de couvrir une gamme de température allant de 40 à 150 °C selon la longueur de la chaîne carbonée. Les acides gras les plus connus pour leur utilisation comme MCP sont l'acide stéarique ($T_{\text{fusion}} = 57.5$ °C), l'acide sébacique ($T_{\text{fusion}} = 132$ °C), l'acide palmitique ($T_{\text{fusion}} = 61-63$ °C) et l'acide myristique ($T_{\text{fusion}} = 51.5-53.6$ °C) [27].

Avantage

Les acides gras présentent une chaleur latente de fusion du même ordre que celle des paraffines, voire légèrement en-dessous et un comportement similaire lors de la transition de phase, avec pas ou très peu de surfusion et une variation de volume du même ordre de grandeur. Par ailleurs, plus le nombre de carbones dans leur chaîne carbonée est élevé, plus la température de fusion, la chaleur latente ainsi que le degré de cristallisation sont grands [20]. La possibilité d'obtenir des mélanges eutectiques d'acides gras, a permis d'élargir la plage de température des matériaux et ainsi la plage des applications [28]. Les acides gras sont facilement produits à partir d'huiles végétales et animales. Ainsi, ils donnent l'assurance d'un approvisionnement bio-sourcé.

Inconvénients

Quelques auteurs constatent un problème de stabilité des acides gras au-dessus du point de fusion [29]. Cette dégradation peut être cependant due à la vaporisation du produit lorsqu'il est sous forme liquide et non à une réelle dégradation du produit.

Dans cette catégorie, on peut citer notamment les paraffines n-Hexadecane ($T_{\text{fusion}} = 22 \text{ °C}$), n-Nonacosane ($T_{\text{fusion}} = 63,4 \text{ °C}$) ou encore le n-Triacontane ($T_{\text{fusion}} = 65,4 \text{ °C}$) [20].

Avantages

En général, plus la longueur moyenne de la chaîne hydrocarbonée est élevée, plus la température de fusion et la chaleur latente sont grandes [21]. En utilisant cette relation, des mélanges de différentes paraffines peuvent être faits pour imaginer le MCP approprié à chaque cas [20]. Les paraffines ne montrent pas de tendance à la ségrégation des phases lors de leur transition et sont chimiquement stables. En effet, Hadjieva et al. [22] ont pu tester la robustesse de trois échantillons de paraffine pendant 900 cycles d'opération. A. Sharma et al. [14] affirme même que les propriétés des paraffines restent stables après 1500 cycles. Parmi les avantages des paraffines, on peut aussi citer [3] :

- ✓ L'enthalpie de fusion varie entre 180 et 230 kJ/kg. Cette valeur est grande par rapport à celle des autres matériaux organiques dont la capacité thermique massique est de 2.1 kJ/kg.K en tenant compte des deux valeurs (chaleur sensible et chaleur latente). On obtient une densité importante d'énergie de stockage. La capacité volumique de stockage de chaleur est 4-5 fois supérieure à celle de l'eau.
- ✓ La surfusion est négligeable. La pression de vapeur de fusion est faible même à des températures relativement hautes.
- ✓ Elles sont stables chimiquement mais, il faut les protéger de l'air pour éviter l'oxydation. En particulier, quand elles sont chaudes leur dégradation est similaire à celle des acides organiques.
- ✓ Il n'y a pas de ségrégation de phase.
- ✓ Les cires paraffiniques sont inertes chimiquement (d'où le nom paraffine) avec presque tous les matériaux (sauf certains plastiques ou le cuivre). Il y a donc peu de problèmes de corrosion avec les paraffines et leur conteneur. En

effet, les cires paraffiniques sont utilisées pour protéger les matériaux de la corrosion (vernis de protection dans l'industrie automobiles).

- ✓ Les cires paraffiniques ne présentent aucun danger écologique. Elles n'ont pas d'effets négatifs sur les plantes, les animaux, l'eau ou les micro-organismes. Elles sont non-toxiques et 100 % recyclables.
- ✓ Quelques paraffines commerciales sont adaptées aux applications de l'énergie solaire. Pour les applications dans les bâtiments, une paroi contenant 3 cm d'épaisseur de paraffine est l'équivalent thermique d'une paroi en béton de 40 cm.
- ✓ La masse volumique de la phase liquide des paraffines varie de 750 à 850 kg/m³ et celle de la phase solide est de 800 à 900 kg/m³. La dilatation volumique est donc environ 15% pendant le processus de changement de phase. On peut éviter ou au moins réduire ce problème par un conditionnement adapté.
- ✓ Les paraffines ordinaires sont souvent des mélanges d'hydrocarbures et ont un prix raisonnable. En fonction de leur composition, elles présentent des points de fusion variés. Par contre, les cires paraffiniques pures sont très coûteuses.

Inconvénients

- ✓ Les cires paraffiniques présentent une très faible conductivité thermique (0,18-0,25 W/m.K), la moitié de celle des hydrates salins. Cette propriété diminue le taux de stockage/déstockage de la chaleur pendant les cycles fusion/solidification. Cette faible conductivité thermique qui est habituellement un handicap, bien que dans le transport de nourriture elle soit un avantage, peut être compensée par une grande surface d'échange ou par un conditionnement adapté [3] (expansion volumique assez élevée $\approx 15\%$ [23]) et une densité peu importante (≈ 800 kg/m³ [20]). Par ailleurs, des précautions sont à prendre lors de l'utilisation des réservoirs en plastique, car

les paraffines ont tendance à s'infiltrer dans certains plastiques et à les ramollir [24].

- ✓ Les cires paraffiniques sont facilement inflammables [3].

B. Acides gras

Les acides gras sont caractérisés par la formule chimique $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$ et ont à peu près les mêmes propriétés thermophysiques que les paraffines. L'intérêt d'utiliser les acides gras comme MCP est de couvrir une gamme de température allant de 40 à 150 °C selon la longueur de la chaîne carbonée. Les acides gras les plus connus pour leur utilisation comme MCP sont l'acide stéarique ($T_{\text{fusion}} = 57.5$ °C), l'acide sébacique ($T_{\text{fusion}} = 132$ °C), l'acide palmitique ($T_{\text{fusion}} = 61-63$ °C) et l'acide myristique ($T_{\text{fusion}} = 51.5-53.6$ °C) [27].

Avantage

Les acides gras présentent une chaleur latente de fusion du même ordre que celle des paraffines, voire légèrement en-dessous et un comportement similaire lors de la transition de phase, avec pas ou très peu de surfusion et une variation de volume du même ordre de grandeur. Par ailleurs, plus le nombre de carbones dans leur chaîne carbonée est élevé, plus la température de fusion, la chaleur latente ainsi que le degré de cristallisation sont grands [20]. La possibilité d'obtenir des mélanges eutectiques d'acides gras, a permis d'élargir la plage de température des matériaux et ainsi la plage des applications [28]. Les acides gras sont facilement produits à partir d'huiles végétales et animales. Ainsi, ils donnent l'assurance d'un approvisionnement bio-sourcé.

Inconvénients

Quelques auteurs constatent un problème de stabilité des acides gras au-dessus du point de fusion [29]. Cette dégradation peut être cependant due à la vaporisation du produit lorsqu'il est sous forme liquide et non à une réelle dégradation du produit.

C. Alcools de sucre

Les alcools de sucre sont des composés organiques appartenant à la famille des polyols. Les plus connus sont le sorbitol, le mannitol, le xylitol, le lactitol, le malitol et l'érythritol [30]. Ces produits sont extraits des plantes et peuvent être qualifiés de bio-sourcés. Par exemple, le mannitol provient des algues alors que le sorbitol est extrait du sirop de maïs.

Avantages

Les alcools de sucre possèdent des valeurs d'enthalpie de phase élevées. On relève ainsi une enthalpie de fusion de 344 J/g pour l'érythritol, de 280 J/g pour le xylitol ou encore 341 J/g pour le mannitol [31]. Ils présentent aussi une grande masse volumique de l'ordre de 1500 kg/m³, ce qui conduit à une densité énergétique très élevée. Ce sont par ailleurs des produits peu coûteux et non toxiques. Akihide *et al.* [32] ont mesuré les propriétés thermophysiques et de transfert de chaleur de six alcools qui pourraient être utilisés comme MCP dans les systèmes de transport des rejets thermiques. Ces essais montrent que l'érythritol (C₄H₁₀O₄) est le matériau le plus approprié par sa chaleur latente élevée et sa stabilité chimique, suivi du mannitol.

Inconvénients

Un des inconvénients les plus connus des alcools de sucre est leur tendance à la surfusion, qui peut d'ailleurs être utilisée pour faire du stockage inter-saisonnier [30] car elle permet de maintenir le MCP liquide sous le point de solidification sans qu'il libère ainsi sa chaleur. Seulement, cet état métastable empêche la restitution de la chaleur à la température de changement d'état souhaitée. Plusieurs techniques ont été développées pour pallier ce problème de surfusion. Les ultrasons, la micro-encapsulation, le bullage, l'ensemencement ou encore l'agitation sont proposés comme techniques pour maîtriser l'apparition des premiers cristaux.

Par ailleurs, beaucoup d'alcools peuvent exister dans deux ou plusieurs états cristallins, appelés polymorphes [33]. Diverses formes peuvent apparaître pendant

Chapitre 2

Présentation de Labview

2.1. Introduction

Le logiciel LabVIEW est une plate-forme expérimentale d'instruments virtuels pour laboratoire, (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*). C'est un environnement de programmation disponible sur plusieurs systèmes d'exploitation commercialisé par la société "National Instruments». Labview est un langage de programmation graphique qui utilise des icônes au lieu de lignes de texte pour créer des applications. Contrairement aux langages de programmation textuels où ce sont les instructions qui déterminent l'ordre d'exécution du programme. LabVIEW utilise la programmation par flux de données transitant par les nœuds sur le diagramme qui détermine l'ordre d'exécution des VIs et des fonctions.

Les VIs, ou instruments virtuels, sont des programmes LabVIEW qui imite les instruments physiques .Dans LabVIEW, l'interface utilisateur est construite à l'aide d'un ensemble d'outils et d'objets. L'interface utilisateur d'un VI est appelée la face-avant. Ensuite, un code est créé en utilisant des représentations graphiques de fonctions pour commander les objets de la face-avant. Ce code source graphique est aussi appelé code G ou code du diagramme. Le diagramme contient ce code qui ressemble à un organigramme.

2.2. Les instruments virtuels

Les programmes LabVIEW sont appelés instruments virtuels, ou VIs (**V**irtuel **I**nstrument), car leur apparence et leur fonctionnement s'apparentent à ceux des instruments réels, tels que les oscilloscopes et les multimètres. LabVIEW contient une grande gamme d'outils pour l'acquisition, l'analyse, l'affichage et l'enregistrement des données, ainsi que des outils pour nous aider à mettre au point votre programme.

Le langage de programmation employé par LabVIEW est le langage graphique G. Ce langage est assimilable aux langages orientés objet, tel le C++, offrant des classes de données ayant des attributs spécifiques, ainsi que des opérateurs et des fonctions polymorphes agissant sur les données.

Tout programme exécutable construit en langage G comporte une interface utilisateur et un programme graphique situés dans deux fenêtres distinctes (**panneau avant (front panel)** et **diagramme (Bloc diagram)**). L'environnement LabVIEW offre, dans trois autres fenêtres distinctes, des palettes indépendantes d'outils et d'objets permettant d'éditer les deux fenêtres du programme et de tester son fonctionnement.

- ✚ **Face-avant** : Sert d'interface utilisateur.
- ✚ **Diagramme** : Contient le code source graphique qui définit les fonctionnalités du VI.
- ✚ **Icône et connecteur** : Identifie l'interface au VI pour pouvoir l'utiliser dans un autre VI. Un VI à l'intérieur d'un autre VI est appelé sous-VI. Un sous-VI correspond à un sous-programme dans des langages de programmation textuels.

le LabVIEW est utilisé pour communiquer avec le matériel comme, par exemple, d'acquisition de données ou d'images, les périphériques de commande d'axes et les instruments GPIB, PXI, VXI, RS232 et RS485.

2.2.1. Les composantes d'un instrument virtuel

2.2.1.1. La face-avant

La face-avant est l'interface utilisateur d'un VI. Elle est conçue bien avant de concevoir le diagramme nécessaire pour effectuer les tâches sur les entrées et les sorties créées sur la face-avant.

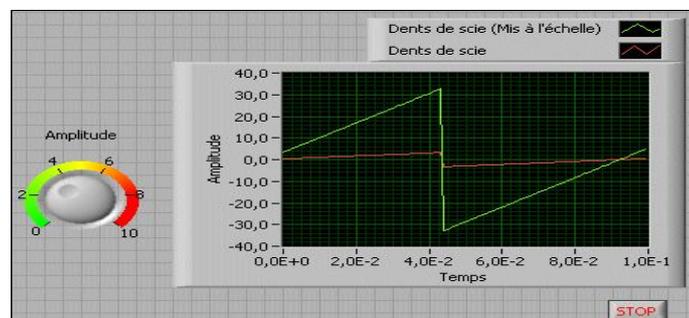


Fig. 2.1. Exemple de face-avant

2.2.1.2. Diagramme

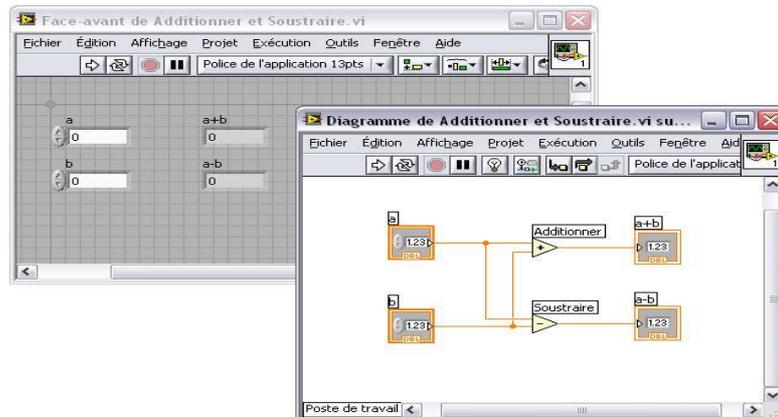


Fig. 2.2. Exemple de diagramme

Après avoir construit la face-avant, le code est ajouté en utilisant les représentations graphiques des fonctions pour contrôler les objets de la face-avant. Le diagramme contient ce code source graphique, aussi appelé code G ou code du diagramme.

2.2.1.3. Création de VIs et de sous-VIs

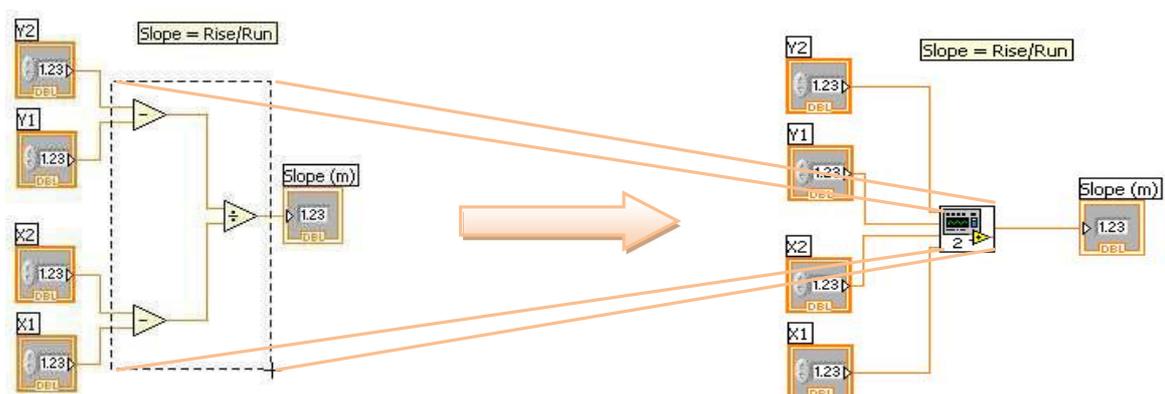


Fig. 2.3. Création de sous VI

Un VI peut servir d'interface utilisateur ou d'opération utilisée fréquemment. Après la construction d'une face-avant et un diagramme, on peut créer les VI et sous-VI. Une fois un VI construit, on peut l'utiliser dans un autre VI. Un VI appelé

à partir du diagramme d'un autre VI est appelé sous-VI. On peut réutiliser un sous-VI dans d'autres VI.

Un nœud de sous-VI correspond à un appel de sous-programme dans des langages de programmation textuels. Le nœud n'est pas le sous-VI lui-même, tout comme un appel de sous-programme dans un programme n'est pas le sous-programme lui-même. Un diagramme qui contient plusieurs nœuds de sous-VI identiques appelle le même sous-VI plusieurs fois. Les commandes et indicateurs d'un sous-VI échangent des données avec le diagramme du VI appelant.

2.3. Environnement LabVIEW

2.3.1. Palette des commandes

La palette **Commandes** est disponible uniquement sur la face-avant. La palette **Commandes** contient les commandes et les indicateurs utilisés pour créer la face-avant. Les commandes et les indicateurs sont situés dans des sous-palettes en fonction du type de commande et d'indicateur.

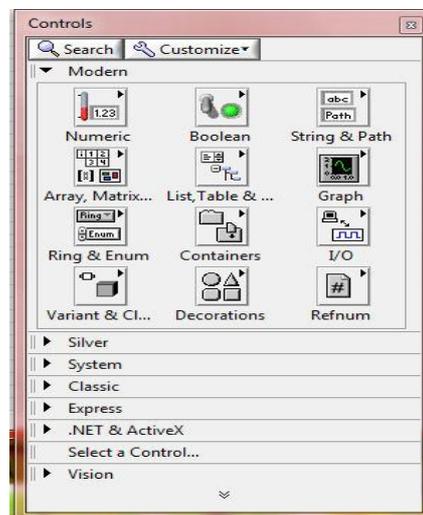


Fig. 2.4. Palette de controls

2.3.2. Palette des fonctions

La palette **Fonctions** est disponible uniquement sur le diagramme. La palette **Fonctions** contient les VIs et les fonctions utilisées pour construire le diagramme.

Les VIs et les fonctions sont situées dans des sous-palettes en fonction du type de VI ou de la fonction.

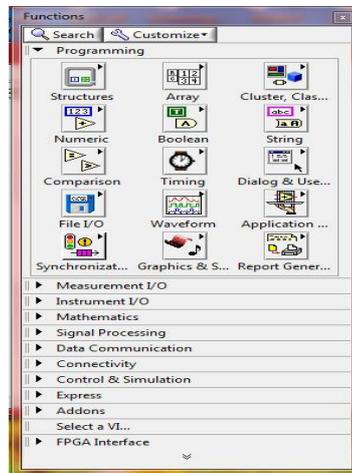


Fig. 2.5. Palette de fonctions

2.3.3. Palette d'outils

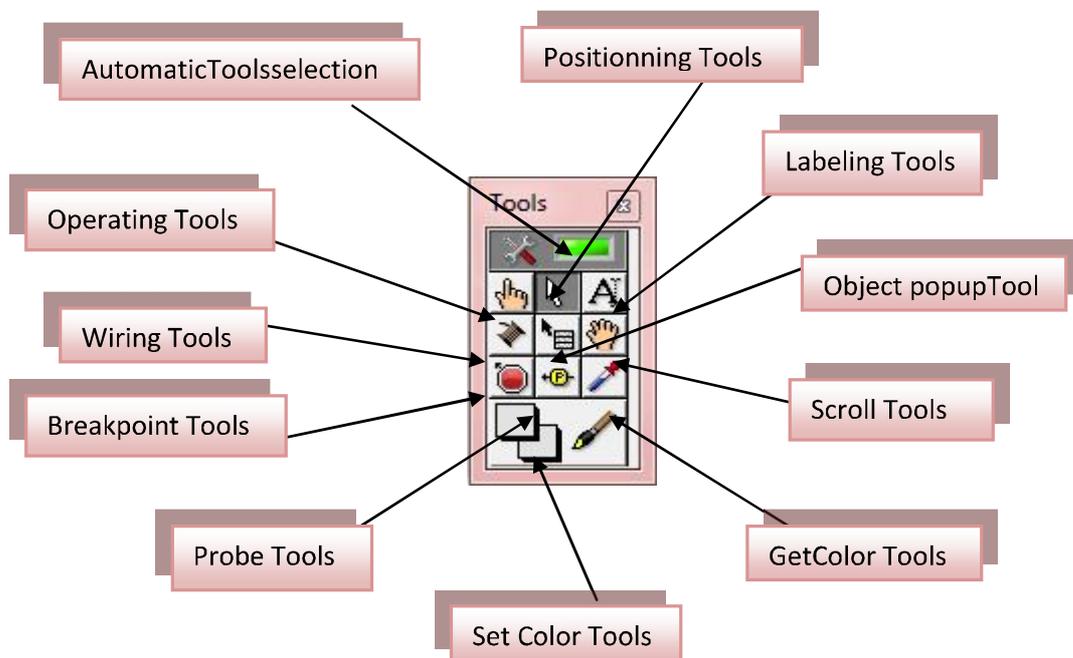


Fig. 2.6. Palettes d'outils

➤ Menus

Les menus en haut de la fenêtre d'un VI contiennent des éléments communs à d'autres applications, tels que **Ouvrir**, **Enregistrer**, **Copier** et **Coller**, ainsi que d'autres éléments spécifiques à LabVIEW. Certains éléments de menu dressent la liste des raccourcis clavier.

➤ Barre d'outils du VI

Utiliser les boutons de la barre d'outils du VI pour exécuter les VIs, mettre les VIs en pause ou les arrêter définitivement, mettre au point des VIs, et pour configurer les polices et aligner, regrouper et distribuer les objets

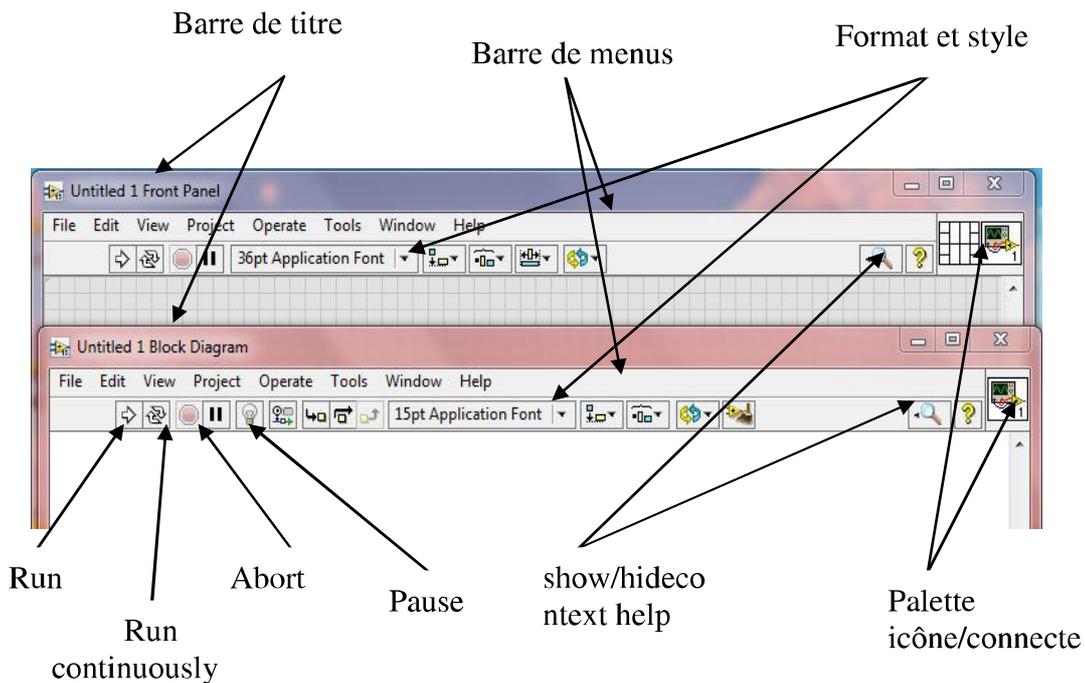


Fig. 2.7. Caractères communs des deux fenêtres

2.3.4. Construction de la face-avant

La face-avant est construite avec des commandes et des indicateurs qui sont respectivement les terminaux d'entrée et de sortie interactifs du VI. Les commandes sont des boutons rotatifs, des boutons poussoirs, des cadrans et autres mécanismes

d'entrée. Les indicateurs sont des graphes, des LED et d'autres afficheurs de sortie. Les commandes simulent les mécanismes d'entrée des instruments et fournissent des données au diagramme du VI. Les indicateurs simulent les mécanismes de sortie d'instruments et affichent les données que le diagramme acquiert ou génère.

2.3.4.1. Commandes et indicateurs de la face-avant

Utiliser les commandes et les indicateurs de la face-avant, situés sur la palette **Commandes**, pour construire la face-avant. Les différents types de commandes et d'indicateurs comprennent entre autres des types numériques, comme des glissières et des boutons rotatifs, des graphes, des graphes déroulants, des types booléens comme des boutons et des interrupteurs, des chaînes, des chemins, des tableaux, des clusters, des listes déroulantes, des menus déroulants, des énumérations, des conteneurs et des commandes arbre.

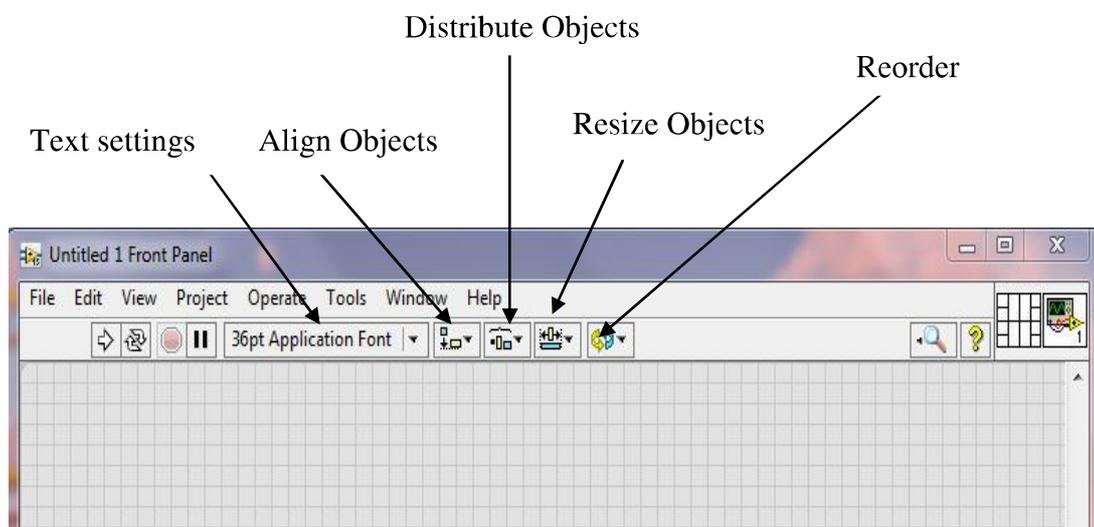


Fig. 2.8. Palette de boutons spécifiques au mode d'édition

➤ Commandes et indicateurs modernes et classiques

De nombreux objets de la face-avant s'affichent avec un nombre de couleurs élevé. Configurer le moniteur sur un affichage de couleur d'au moins 16 bits pour obtenir un affichage optimal des objets. Les commandes et indicateurs de la palette **Commandes modernes** ont aussi des objets correspondants qui utilisent un nombre

réduit de couleurs. Utiliser les commandes et les indicateurs situés sur la palette **Commandes classiques** afin de créer des VIs compatibles avec des affichages 256 et 16 couleurs.

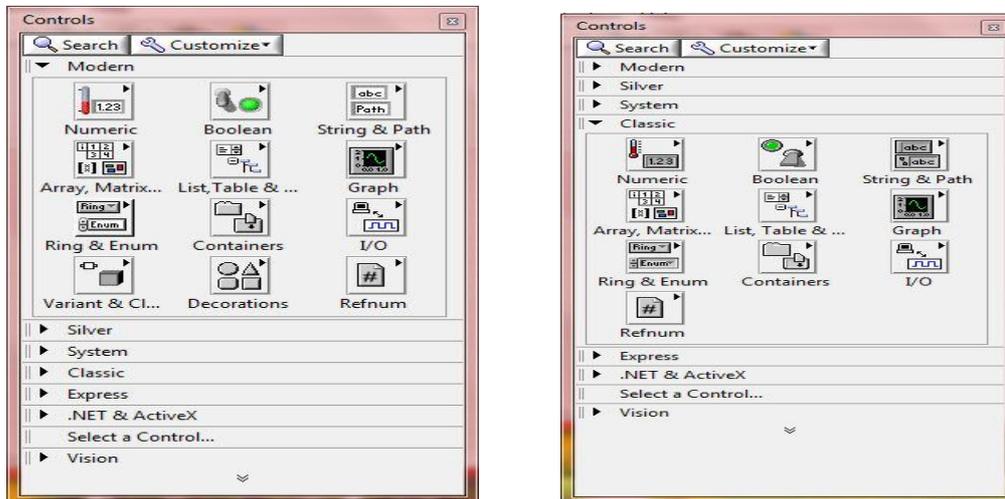


Fig. 2.9. Palette des commandes et indicateurs modernes et classiques

➤ Commandes et indicateurs système

Les commandes et indicateurs système sont spécifiquement conçus pour être utilisés dans des boîtes de dialogue et comprennent des commandes de menu déroulant et des commandes numériques pour boîtes de dialogue, des glissières numériques, des barres de progression, des barres de défilement, des listes déroulantes, des tables, des commandes chaîne et chemin, des commandes onglet et arbre, des boutons, des cases à cocher, des boutons radio et une étiquette opaque qui s'ajuste automatiquement à la couleur d'arrière-plan. Seule l'apparence diffère entre ces commandes et celles de la face-avant. Ces commandes apparaissent avec les couleurs définies pour notre système.

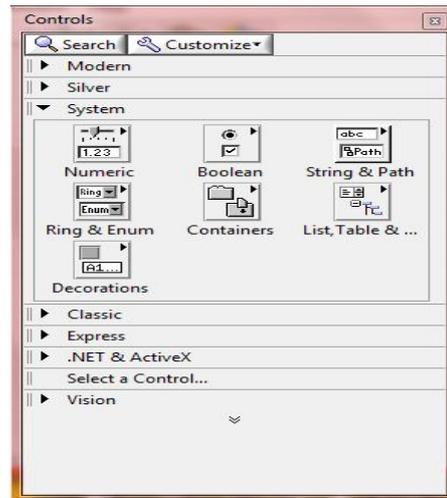


Fig. 2.10. Palette de commandes et indicateurs système

2.3.4.2. Graphes et graphes déroulants

Utiliser les commandes et indicateurs de graphe des palettes **Graphe** et **Graphe classique** pour tracer des données numériques sous forme de graphe ou de graphe déroulant.

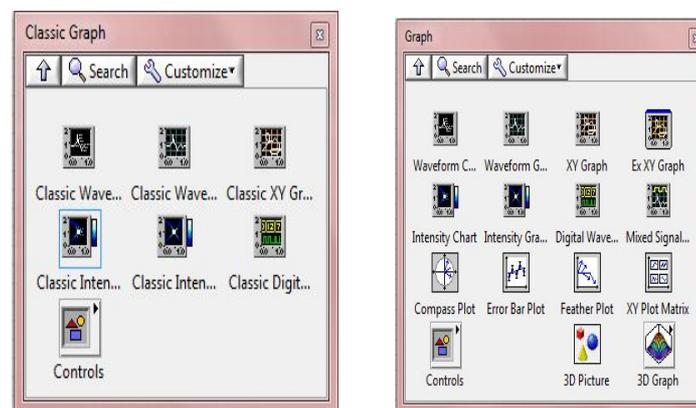


Fig. 2.11. Palette des graphes

2.3.5. Construction du diagramme

Après avoir construit la face-avant, on doit ajouter le code en utilisant les représentations graphiques des fonctions pour commander les objets de la face-

avant. Le diagramme contient ce code source graphique, aussi appelé code G ou code du diagramme. Les objets de la face-avant apparaissent en tant que terminaux sur le diagramme. Le VI suivant montre plusieurs objets élémentaires du diagramme, tels que des terminaux, des fonctions et des fils de liaison.

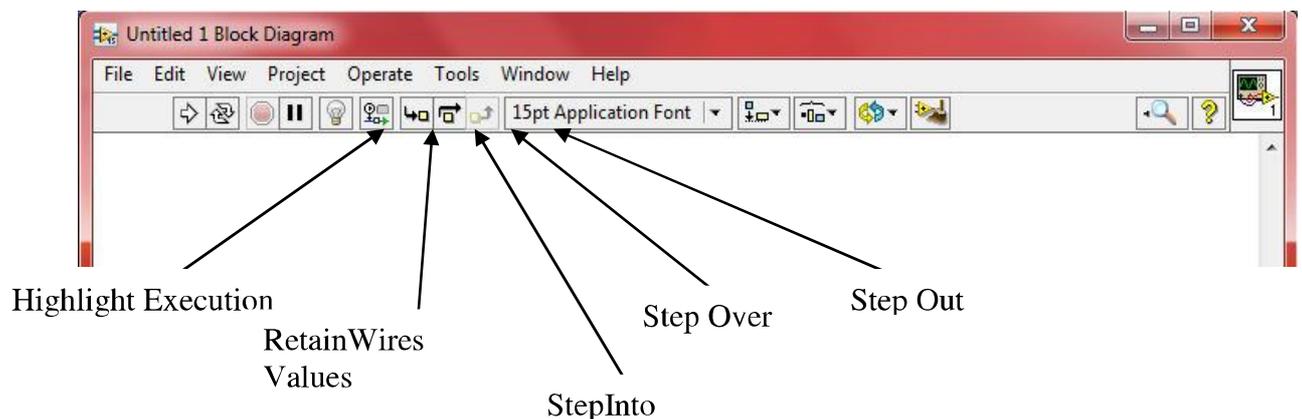


Fig. 2.12. Outils spécifiques au diagramme

Les objets sur le diagramme se composent de terminaux et de nœuds. On peut construire des diagrammes en connectant les objets au moyen de fils de liaison. La couleur et le symbole de chaque terminal indiquent le type de données de la commande ou de l'indicateur correspondant. Les constantes sont des terminaux du diagramme qui fournissent des données à valeur fixe au diagramme.

2.3.6. Boucles et structures

Les structures sont des représentations graphiques de boucles et de conditions dans les langages de programmation textuels. Utiliser des structures dans le diagramme pour répéter des blocs de code et pour exécuter le code de manière conditionnelle ou dans un ordre spécifique.

Tout comme les autres nœuds, les structures possèdent des terminaux qui les connectent à d'autres nœuds du diagramme, elles s'exécutent automatiquement lorsque des données en entrée sont disponibles et fournissent des données aux fils de liaison de sortie lorsque l'exécution est terminée. Chaque structure a une bordure

spécifique et redimensionnable pour contenir la section du diagramme qui s'exécute selon les règles de la structure. La section du diagramme à l'intérieur du cadre de la structure est appelée sous-diagramme. Les terminaux qui fournissent et récupèrent les données dans les structures sont appelés des tunnels. Un tunnel est un point de connexion sur le cadre d'une structure. Utiliser les structures suivantes de la palette **Structures** pour contrôler l'exécution du diagramme :

❖ **Boucle For** : Exécute un sous-diagramme un certain nombre de fois.

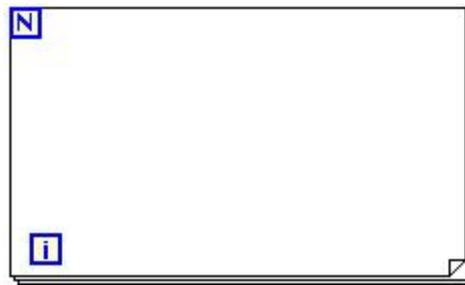


Fig. 2.13. Boucle for

-  Entrée numérique
Nombre total d'exécution défini par l'utilisateur
-  Sortie numérique
Nombre d'itération effectuée

❖ **Boucle While** : Exécute un sous-diagramme jusqu'à ce qu'une condition ait lieu.



Fig. 2.14. Boucle while

- ❖ **Structure Condition** : Contient plusieurs sous-diagrammes, un seul d'entre eux s'exécutant selon la valeur d'entrée transmise à la structure.

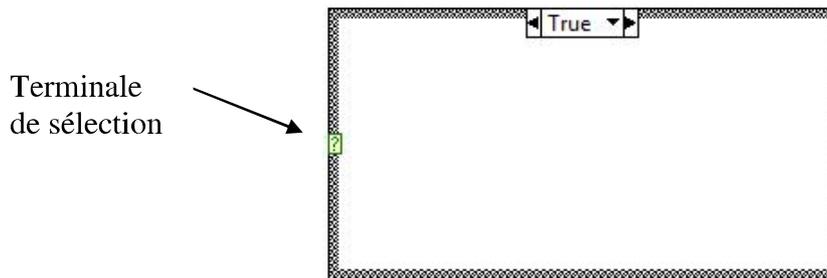


Fig. 2.15. Structure condition

- ❖ **Structure Séquence** : Contient un ou plusieurs sous-diagrammes, qui s'exécutent séquentiellement



Fig. 2.16. Structure séquence

- ❖ **Structure Événement** : Contient un ou plusieurs sous-diagrammes s'exécutant selon l'interaction de l'utilisateur avec le VI.

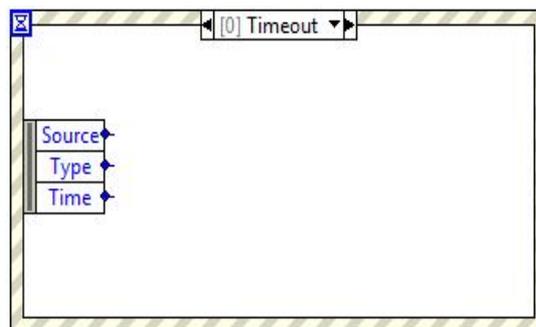


Fig. 2.17. Structure évènement



Chapitre 3

Présentation de l'interface Labview

3.1. Présentation de l'interface

L'interface du Labview se compose de deux espaces appelés fenêtres de travail, qui sont séparées mais associées l'une à l'autre.

- ❖ **1^{ère} fenêtre** : face avant, appelée *front panel* : elle contient les contrôles et les afficheurs de données, représentés par : interrupteurs, variateurs, potentiomètres avec curseurs, boîtes de dialogue, LEDs, compteurs à aiguilles, vu-mètres, boîtes de message et graphes.

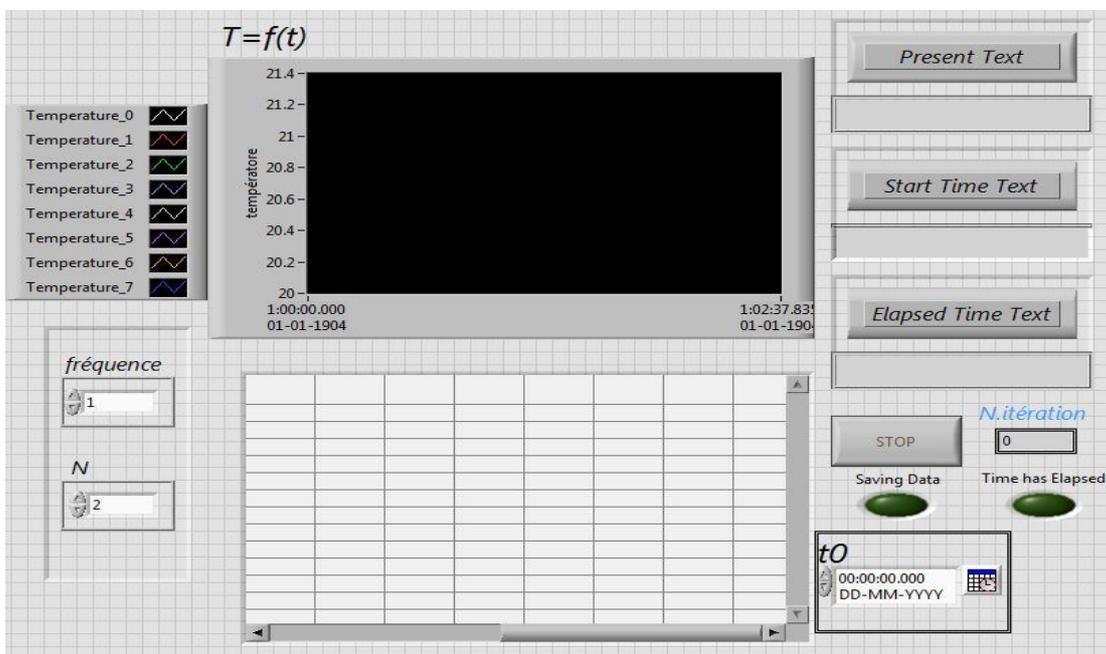


Fig. 3.1. Face avant du Labview

- ❖ **2^{ème} fenêtre** : Diagrammes appelée *block diagram* : elle contient les programmes terminaux des commandes, représentés par : nœuds (sous-programme, fonctions, structures, interfaces code), constantes, terminaux d'affichage, des connecteurs et des fils.

3.2. Développement d'instruments virtuels

3.2.1. Boucle While

Comme les boucles Do et les boucles Repeat-Until des langages de programmation textuels, les boucles While, représentées ci-après, exécutent un sous-diagramme jusqu'à ce qu'une condition ait lieu.



Fig. 3.2. Boucle while

La boucle While (**while loop**) exécute le sous-diagramme jusqu'à ce que le terminal de condition (terminal d'entrée), reçoive une valeur booléenne particulière. Par défaut, le comportement et l'apparence du terminal de condition correspond à **Arrêter sur condition Vraie (stop if true)** .

Lorsqu'un terminal de condition est défini sur **Arrêter sur condition Vraie (stop if true)**, la boucle While exécute son sous-diagramme jusqu'à ce que le terminal de condition reçoive une valeur VRAI. Nous pouvons changer le comportement et l'apparence du terminal de condition en cliquant avec le bouton droit sur le terminal ou sur le cadre de la boucle While et en sélectionnant **Continuer sur condition Vraie (continue if true)**, dans le menu local. Il aura alors l'apparence suivante .

Lorsqu'un terminal de condition est défini sur **Continuer sur condition Vraie (continue if true)**, la boucle While exécute son sous-diagramme jusqu'à ce que le terminal de condition reçoive une valeur FAUX. Nous pouvons aussi utiliser l'outil Doigt pour cliquer sur le terminal de condition afin de changer la condition.

Si nous mettons le terminal de la commande booléenne hors de la boucle While, comme présenté dans la figure suivante, et que la commande est définie à

FAUX si le terminal de condition est défini à **Arrêter sur condition Vraie**, nous créons une boucle infinie une fois la boucle démarrée.

Nous créons également une boucle infinie si la commande hors de la boucle est égale à VRAI et que le terminal de condition est défini à **Continuer sur condition Vraie**.

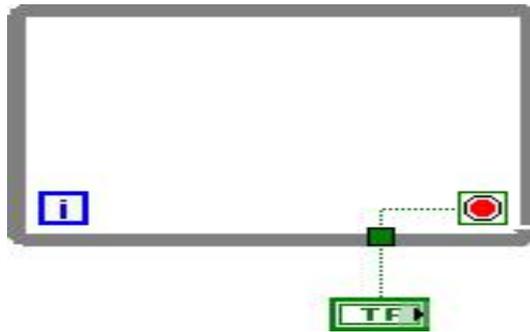


Fig. 3.3. Terminal conditionnelle hors la boucle

Le changement de la valeur de la commande n'arrête pas la boucle infinie parce que la valeur n'est lue qu'une fois, avant que la boucle ne démarre. Pour arrêter une boucle infinie, nous devons abandonner le VI en cliquant sur le bouton **Abandonner (Abort Execution)** de la barre d'outils.

Nous pouvons également réaliser une gestion d'erreur élémentaire en utilisant le terminal de condition d'une boucle While. Lorsque nous câblons un cluster d'erreur au terminal de condition, seule la valeur VRAI ou FAUX du paramètre **état** du cluster d'erreur est transmis au terminal. En outre, les éléments du menu local **Arrêter sur condition Vraie** et **Continuer sur condition Vraie** deviennent **Arrêter si une erreur se produit** et **Continuer tant que l'erreur est présente**.

Le terminal d'itération (terminal de sortie) contient le nombre d'itérations achevées.



Le comptage des itérations démarre toujours à zéro. Pendant la première itération, le terminal d'itération renvoie **0**.

Ajoutez des registres à décalage à la boucle While pour transmettre les données de l'itération actuelle à l'itération suivante.

3.2.2. Contrôle de la vitesse

Pour contrôler la vitesse d'exécution d'un processus, par exemple, la vitesse à laquelle les données sont placées sur un graphe déroulant, nous pouvons utiliser une fonction **Attendre dans la boucle** pour patienter durant une période de temps exprimée en millisecondes avant que la boucle ne s'exécute à nouveau.

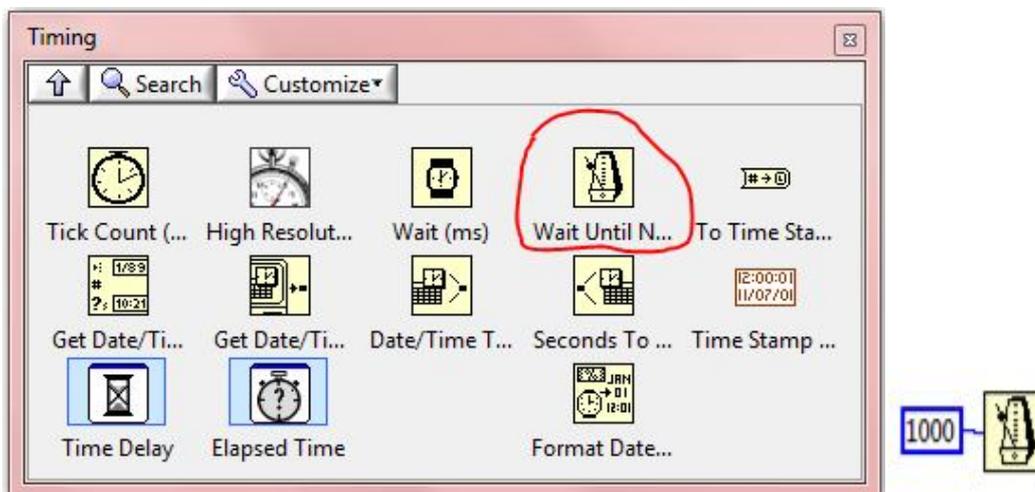


Fig. 3.4. Vitesse d'exécution

3.2.3. Auto-indexation de boucle

Si nous relierons un tableau à un tunnel d'entrée d'une boucle For ou d'une boucle **While**, nous pouvons lire et traiter chaque élément de ce tableau en activant l'auto-indexation.

Lorsque nous relierons un tableau à un tunnel d'entrée situé sur le cadre de la boucle et que nous activons l'auto-indexation sur le tunnel d'entrée, les éléments de ce tableau entrent dans la boucle à raison d'un élément par itération, en commençant par le premier élément. Lorsque l'auto-indexation est désactivée, le tableau entier est transmis dans la boucle. Lorsque nous auto-indexons un tunnel de sortie d'un tableau, le tableau en sortie reçoit un nouvel élément à chaque itération de la boucle.

Ainsi, les tableaux auto-indexés en sortie ont toujours une taille égale au nombre d'itérations. Par exemple, si la boucle s'exécute 10 fois, le tableau en sortie possède 10 éléments. Si nous désactivons l'auto-indexation sur un tunnel de sortie, seul l'élément de la dernière itération de la boucle est transmis au nœud suivant dans le diagramme.

Le clique par le bouton droit sur le tunnel au bord de la boucle avec la sélection **Activer l'indexation** ou **Désactiver l'indexation** dans le menu local pour activer ou désactiver l'auto-indexation, par défaut, l'indexation automatique est désactivée pour les boucles **While**.

❖ Auto-indexation dans les boucles **While**

Si nous activons l'auto-indexation pour un tableau entrant dans une boucle **While**, cette dernière indexe le tableau au même titre qu'une boucle **For**. Cependant, le nombre d'itérations exécutées par une boucle **While** n'est pas limité par la taille du tableau, car la boucle **While** continue l'itération jusqu'à ce qu'une condition spécifique ait lieu. Lorsqu'une boucle **While** procède à une indexation au-delà de la fin du tableau en entrée, la valeur par défaut du type d'élément de tableau est transmise à la boucle.

Nous pouvons empêcher que la valeur par défaut ne soit transmise à la boucle **While** en utilisant la fonction **Taille** d'un tableau. Cette dernière indique le nombre d'éléments figurant dans le tableau. Il faut définir la boucle **While** pour qu'elle arrête l'exécution après un nombre d'itérations égal à la taille du tableau.

3.2.3.1. Registres à décalage

Utilisez les registres à décalage lorsque nous voulons faire passer les valeurs d'itérations précédentes à l'itération suivante par l'intermédiaire de la boucle. Un registre à décalage apparaît sous la forme d'une paire de terminaux, représentés ci-après, directement à l'opposé l'un de l'autre sur les côtés verticaux du cadre de la boucle.



Le terminal de droite contient une flèche vers le haut qui stocke les données à la fin d'une itération. LabVIEW transfère les données connectées à droite du registre jusqu'à l'itération suivante. Après l'exécution de la boucle, le terminal sur le côté droit de la boucle renvoie la dernière valeur stockée dans le registre à décalage.

Pour créer un registre à décalage, on clique par le bouton droit sur le bord gauche ou droit d'une boucle et en sélectionnant **Ajouter un registre à décalage (Add shift Register)** dans le menu local.

3.2.4. Les conditions initiales

Le type de données **waveform** transmet les données, l'heure de début et le delta t d'une **waveform**. Nous pouvons créer une **waveform** à l'aide de la fonction **Construire une Waveform**. La majorité des **VI**s et des fonctions que nous utilisons pour acquérir et analyser des signaux, acceptent et renvoient le type de données **waveform** par défaut. Lorsque nous relient les données de type **waveform** à un graphe ou à un graphe déroulant, le graphe ou le graphe déroulant trace automatiquement une **waveform** basée sur les données, le temps de départ et le delta x du signal. Lorsque nous relient un tableau de données **waveform** à un graphe ou à un graphe déroulant, le graphe ou le graphe déroulant trace automatiquement toutes les **waveforms**.

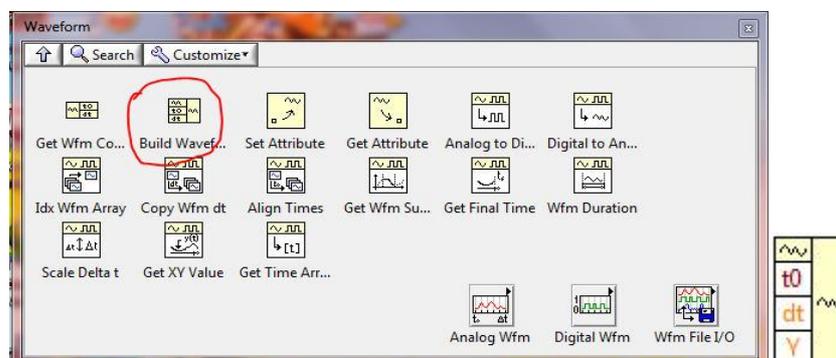


Fig. 3.5. Lecture des données

Pour lire les **waveforms** à partir d'un fichier, il faut utiliser le VI. Après avoir lu une seule **waveform**, nous pouvons ajouter ou modifier des composantes des données **waveform** grâce à la fonction **Construire une waveform** ou bien, nous pouvons extraire des composantes de données **waveform** à l'aide de la fonction **Obtenir un attribut de waveform**.

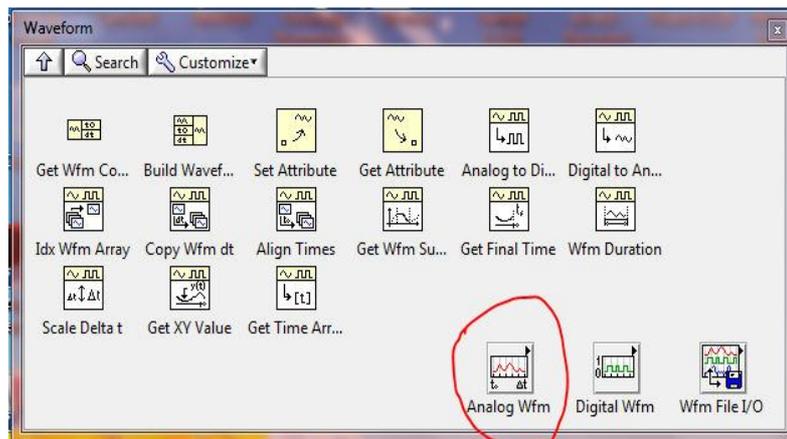


Fig. 3.6. Palette des waveforms

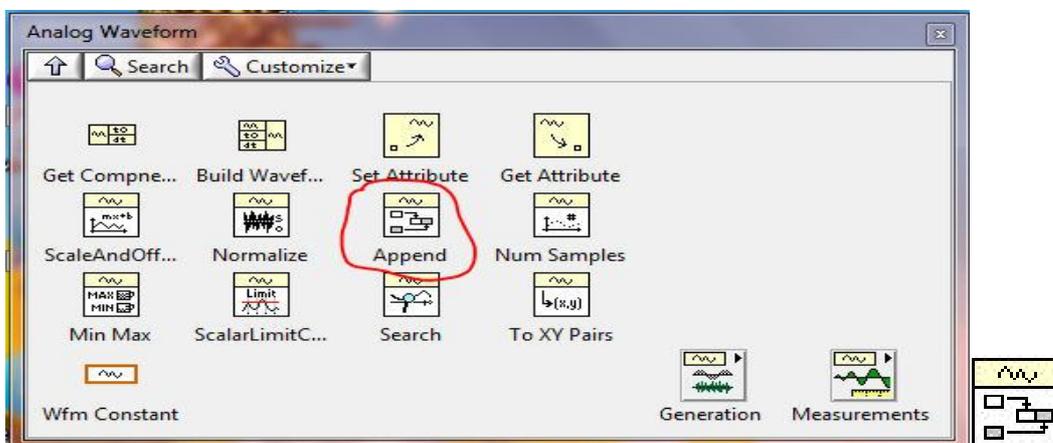


Fig. 3.7. Analog waveform

3.2.5. Graphes

Le graphe affiche un ou plusieurs tracés de mesures échantillonnés de manière constante. Le graphe ne trace que les fonctions à une seule valeur, par exemple dans $y = f(x)$ avec des points distribués également le long de l'axe des X,

exemple des **waveforms** acquises qui varient dans le temps. La figure suivante montre un exemple de graphe.

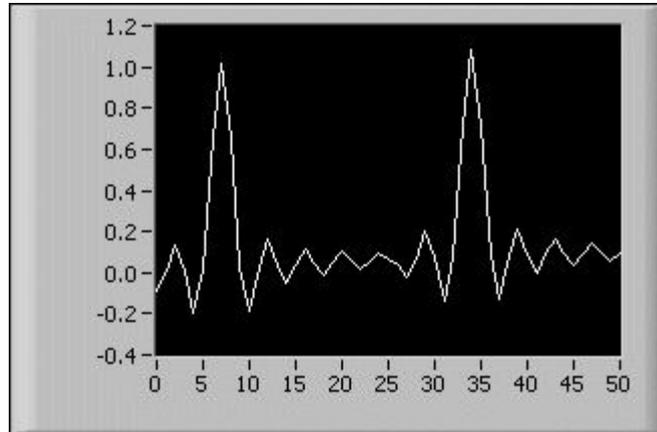


Fig. 3.8. Exemple de graphe

3.2.5.1. Graphes déroulants

Le graphe déroulant est un type particulier d'indicateur numérique qui affiche un ou plusieurs tracés d'échantillons acquis à une vitesse constante. La figure suivante montre un exemple de graphe déroulant.

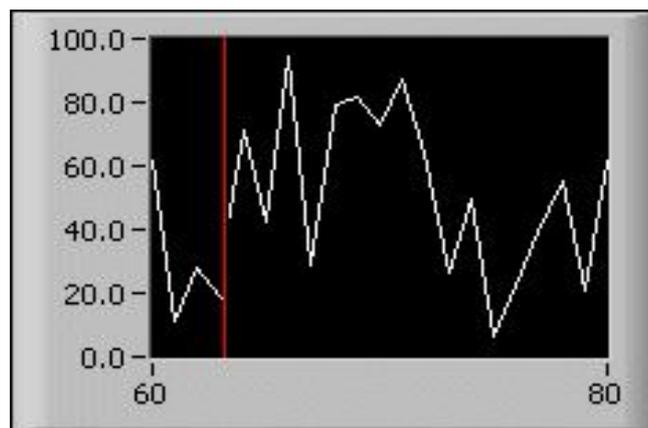


Fig. 3.9. Graphe déroulant

3.3. Communication d'Acquisition de données avec des instruments (Windows)

Exemple de chaîne d'acquisition de données

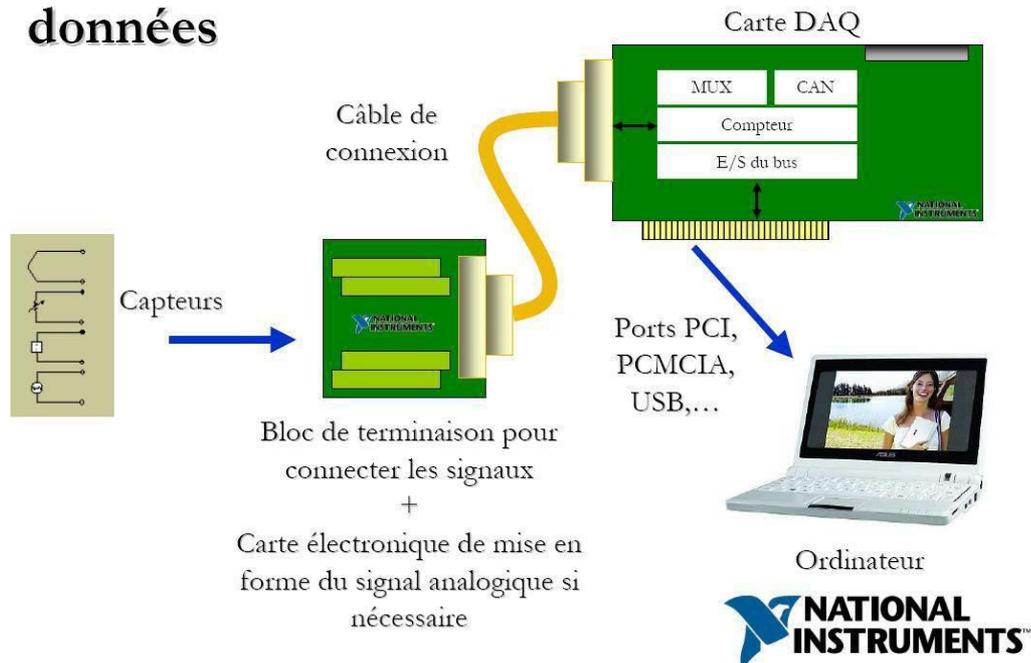


Fig. 3.10. Exemple de chaîne d'acquisition des données

LabVIEW a la capacité de se connecter à un grand nombre de périphériques matériels et d'interagir avec eux.

3.3.1. Acquisition d'un signal dans NI-DAQmx

Nous utiliserons le VI Express Assistant DAQ pour créer une tâche dans NI-DAQmx qui est une interface de programmation permettant de communiquer avec les périphériques d'acquisition de données.

3.3.1.1. Création d'une tâche NI-DAQmx

Dans NI-DAQmx, une tâche est composée d'un ensemble d'une ou de plusieurs voies contenant des propriétés de cadencement, de déclenchement et autres.

Fondamentalement, une tâche représente la mesure ou la génération que nous voulons réaliser. Par exemple, nous pouvons créer une tâche pour mesurer la température sur une ou plusieurs voies d'un périphérique **DAQ**.

- ❖ Sur le diagramme, il faut afficher la palette **Fonctions (functions)** et sélectionner «**Express**»**Entrée (express)**» **input**) pour afficher la palette **input**.

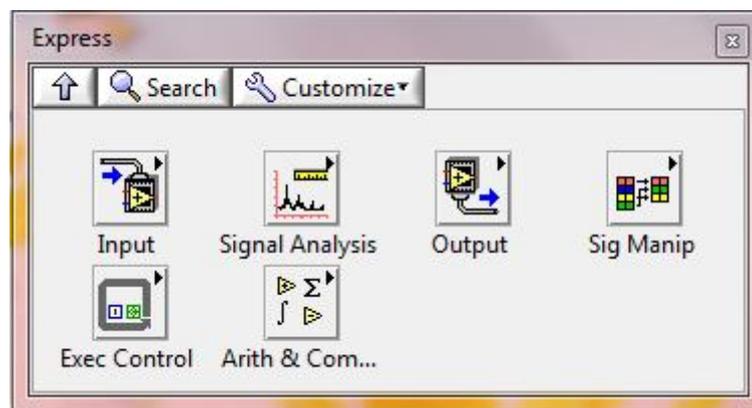


Fig. 3.11. Palette express



Fig. 3.12. Palette input

- ❖ Il faut sélectionner le **VI Express Assistant DAQ**, illustré ci-dessous, sur la **palette Entrée (palette input)** et le placer sur le diagramme. L'Assistant **DAQ** se lance et la boîte de dialogue **Créer un nouvel objet Tâche Express** apparaît.



Fig. 3.13. Terminal de VI Express

- ❖ Il faut sélectionner **température>>thermocouple** (**temperature>>thermocouple**) pour créer une nouvelle tâche d'acquisition analogique de température. La boîte de dialogue affiche la liste des voies sur chaque périphérique **DAQ** installé. Le nombre de voies affichées dépend du nombre de voies dont dispose la périphérique **DAQ**.
- ❖ Dans la boîte de dialogue de l'Assistant **DAQ**, sélectionner l'onglet **Configuration** et utiliser la section **Configuration de la température d'entrée**.
- ❖ Utiliser la section **Paramètres de cadencement** au bas de la page **Configuration**. Dans le menu déroulant **Mode d'acquisition (Acquisition mode)**, sélectionner **continuous samples**.
- ❖ Entrer la valeur 2 dans le champ **Échantillons à lire (samples to read)** et la valeur 1 dans **la fréquence (rate)**.
- ❖ Cliquer sur le bouton **OK** pour enregistrer la configuration actuelle et fermer l'Assistant **DAQ**. **LabVIEW** construit le **VI**.

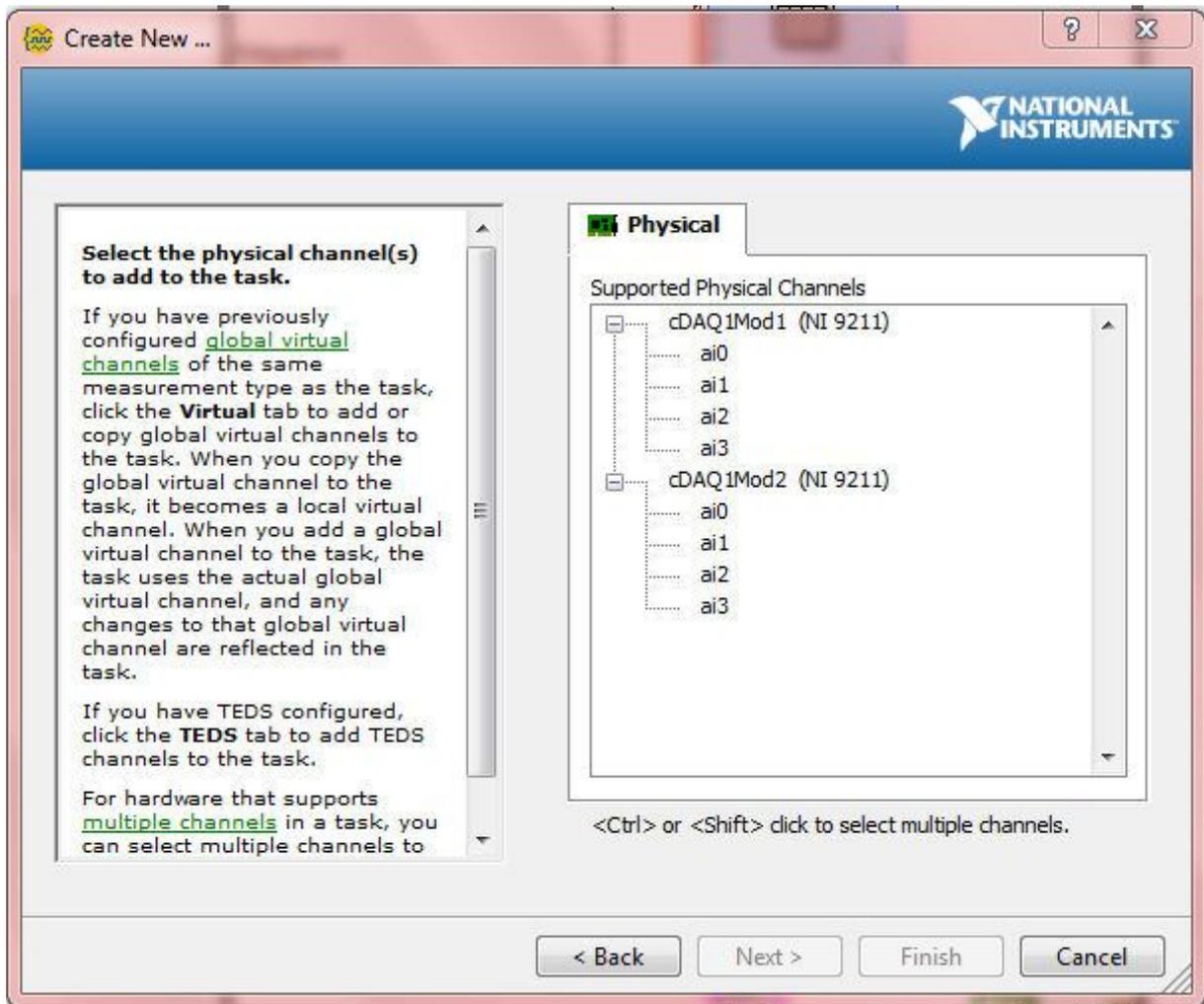


Fig. 3.14. Définition des voies physiques de la carte interface d'acquisition

3.4. Enregistrement de données dans un fichier Excel

Le VI écrit dans un fichier de mesures, enregistre les données générées et analysées par un VI dans un fichier de mesures .lvm,.xlsx,.tdm ou .tdms. Le fichier de mesures textuel (.lvm) est un fichier texte délimité par tabulations que nous pouvons ouvrir avec une application de type tableur ou un éditeur de texte. **LabVIEW** enregistre les données dans un fichier .lvm en utilisant jusqu'à six chiffres de précision. En plus des données générées par un VI Express, le fichier .lvm contient des en-têtes qui comportent des informations relatives aux données, comme la date et l'heure auxquelles **LabVIEW** a généré les données. Le fichier de mesures binaire (.tdm) est un fichier binaire qui contient des données **waveform**.

Les fichiers binaires .tdm offrent une plus grande précision pour les nombres à virgule flottante, prennent moins de place sur le disque et s'exécutent plus rapidement que les fichiers de mesures textuels LabVIEW (.lvm). Le fichier TDM en continu (.tdms) est un fichier binaire dont les performances en écriture sont meilleures que celles du format de fichier .tdm et offre la possibilité d'une interface simplifiée pour la définition des propriétés.

LabVIEW installe le répertoire **LabVIEW Data** dans le répertoire de fichiers par défaut de votre système d'exploitation pour faciliter l'organisation et la recherche des fichiers de données générés par LabVIEW.

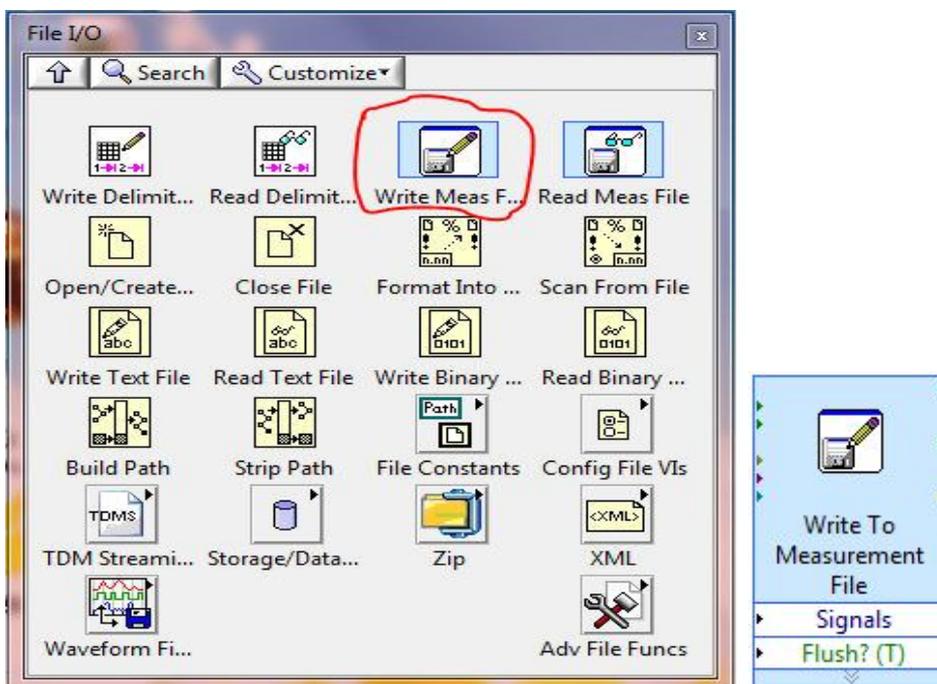


Fig. 3.15. Palette de file I/O

Tab. 5.1. tableau récapitulatif

Temps (min)	Paraffine seul	Grille en Zamak	Plaque en AL
t=60	$f_{\ell} = 52\%$ $T_{\max} = 99.87^{\circ}\text{C}$	$f_{\ell} = 46\%$ $T_{\max} = 92.3^{\circ}\text{C}$	$f_{\ell} = 53\%$ $T_{\max} = 105.58^{\circ}\text{C}$
t=90	$f_{\ell} = 74\%$ $T_{\max} = 110^{\circ}\text{C}$	$f_{\ell} = 68\%$ $T_{\max} = 101.39^{\circ}\text{C}$	$f_{\ell} = 78\%$ $T_{\max} = 110^{\circ}\text{C}$
t=145	$f_{\ell} = 96\%$ $T_{\max} = 120^{\circ}\text{C}$	$f_{\ell} = 95\%$ $T_{\max} = 117.5^{\circ}\text{C}$	$f_{\ell} = 100\%$ $T_{\max} = 125.54^{\circ}\text{C}$
t=180	$f_{\ell} = 100\%$ $T_{\max} = 127.2^{\circ}\text{C}$	$f_{\ell} = 100\%$ $T_{\max} = 121.82^{\circ}\text{C}$	

	Paraffine seul	Grille en Zamak	Plaque en AL
Temps final de fusion (min)	180	180	145

Conclusion générale

Les travaux menés dans ce mémoire concernent la compréhension des mécanismes de transfert durant la fusion des MCP et l'amélioration d'un système de stockage de chaleur qui peut être utilisé par le temps à des fins industrielles. L'étude bibliographique a montré l'intérêt d'utiliser les Matériaux à Changement de Phase en comparaison aux autres systèmes de stockage de chaleur, notamment par leur densité énergétique élevée et la possibilité de restituer la chaleur à température constante. Cependant, leur faible conductivité thermique mène à développer des technologies visant à améliorer le transfert thermique au sein de ces matériaux.

Ce travail a traité une étude expérimentale de la fusion de la paraffine avec la visualisation du comportement de l'interface solide liquide durant le processus et l'enregistrement de l'évolution temporelle de la température dans 08 différents points.

Dans une deuxième partie, la fusion a été améliorée par le rajout de quelques matériaux à conductivité thermique différente, citons le Zamak et l'aluminium.

Les résultats sont acquis à l'aide d'une chaîne d'acquisition type NI et une interface développée à l'aide de logiciel LabVIEW.

Les résultats montrent que l'introduction d'un matériau dans la paraffine absorbe de la chaleur et retarde la fusion durant les premiers instants. Ensuite, une accélération de la fusion est enregistrée.

Plus la conductivité thermique de la matière ajoutée est importante plus l'accélération qui en résulte est importante.

Le Zamak n'a pas contribué à améliorer la fusion de la paraffine. Par contre, l'aluminium a amélioré significativement la conductivité thermique effective du MCP et un gain en temps de fusion de 35 min a été récupéré.

En perspective, il est intéressant de pouvoir simuler numériquement cette étude pour un gain en coût et en temps. Pour cela, l'identification des paramètres numériques est nécessaire (conditions initiales et aux limites, propriétés thermo-physique, etc.). Enfin, il est indispensable de tester d'autres matériaux avec d'autres configurations.

Références bibliographiques

- [1] A. Akrouch ; étude de stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase ; mémoire de magister, université M'Hamed BOUGARA (Boumerdes), Ecole doctorale en Energétique et Développement Durable, 2011.
- [2] Telkes & Al (1978) Telks.M(1978). Trombe wall with phase change storage material. Proceedings of the 2nd national passive solar conference. Philadelphia, PA, USA.
- [3] A. MAHA et Al, thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material, Energy and building, volume 38, issue 6. (2005)
- [4] D. Verdier-Gorcias ; Stockage thermique de protection à chaleur latente intégré à un récepteur solaire à air pressurisé ; thèse de doctorat, Université de Perpignan via domitia, 2016. France.
- [5] A. SOUPART-CARON. Stockage de chaleur dans les Matériaux à Changement de Phase. Thèse doctorat ; Université Grenoble ALPES, 2006.
- [6] H. Mehling et L.F. Cabeza. Heat and cold storage with PCM, Springer - Verlag Berlin Heidelberg ed 2008.
- [7] Ahmed, M. Nouveaux composants Actifs pour la Gestion Energétique de l'Enveloppe Leger des Batiments. PhD. Thèses, université Joseph Fourier. Nov. 2004.
- [8] M. Medrano, A. Gil, I. Martorell, X. Potau, et L. F. Cabeza. State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2-Case studies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 14, no. 1, pp. 56-72, 2010.
- [9] D. Laing, C. Bahl, T. Bauer, D. Lehmann, et W. D. Steinmann. Thermal energy storage for direct steam generation. Sol. Energy, vol. 85, no. 4, pp. 627-633, 2011.
- [10] T. Bauer, D. Laing, et R. Tammé. Characterization of Sodium Nitrate as Phase Change Material. Int J Thermophys, vol. 33, no. 1, pp. 91-104, 2012.
- [11] H. Zhang, R. M. J. Van Wissen, S. V. Nedeia, et C. C. M. Rindt. Characterization of sugar alcohols as seasonal heat storage media - experimental and theoretical investigations. 2014.
- [12] A. Gil, M. Medrano, A. Lazaro, P. Dolado, B. Zabla, L. Cabeza, "State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation Part 1, concepts, materials and modellization", Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010)
- [13] A. Gil, E. Oro, G. Peiro, S. Alvarez, et L. F. Cabeza, "Material selection and testing for thermal energy storage in solar cooling", Renewable Energy, vol. 57, no. 0, pp. 366-371, Sept. 2013.

Références bibliographiques

- [14] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, et D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 2, pp. 318-345, Feb.2009.
- [15] S. Khare, M. Dell'Amico, C. Knight, et S. McGarry, "Selection of materials for high temperature latent heat energy storage", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 107, no. 0, pp. 20-27, Dec.2012.
- [16] A. Sari, form-stable paraffin/high density polyethylene composites as solid-liquid phase change material for thermal energy storage: preparation and thermal properties. *Energy conversion and Management* 45:2033-2042. (2004)
- [17] J.marin..M.zalba, B, cabeza, LF, mehling, H, 2005. Improvement of a Thermal Energy Storage Using Plates with Paraffin-Graphite Composite. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48:2561-2570.
- [18] H. mehling, ,S. heibler, , F zeigler, ,200 latent Heat Storage Using a PCM-Graphite Composite Material. *Proceedings of TERRASTOCK-200, 8thinternational conference on thermal Energy Storage.28th August- 1st september ,200 STUGART, Germany,1 :375-380.*
- [19] D. Buddhi, RL. Sawhney .*Proceeding of thermal energy storage and energy conversion School of energy and environmental studies. Devi Ahilya University. Indore, India,february 24-25. .(1994).*
- [20] K. Pielichowska et K. Pielichowski, "Phase change materials for thermal energy storage", *Progress in Materials Science*, vol. 65, no. 0, pp. 67-123, Aug.2014.
- [21] N. S. Y. U. K. Himran, A. R. Y. A. Suwaono, et G. A. Mansoori, "Characterization of Alkanes and Paraffin Waxes for Application as Phase Change Energy Storage Medium", *Energy Sources*, vol. 16, no. 1, pp. 117-128, Jan.1994.
- [22] M. Hadjieva, S. Kanev, et J. Argirov, "Thermophysical properties of some paraffins applicable to thermal energy storage", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 27, no. 2, pp. 181-187, July1992.
- [23] S. M. Hasnain, "Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques", *Energy Conversion and Management*, vol. 39, no. 11, pp. 1127-1138, Aug.1998.
- [24] M. Akgün, O. Aydin, et K. Kaygusuz, "Experimental study on melting/solidification characteristics of a paraffin as PCM", *Energy Conversion and Management*, vol. 48, no. 2, pp. 669-678, Feb.2007.

Références bibliographiques

- [25] Abhat. Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials solar energy, vol.30, no.4pp. 3 13-332 (1983).
- [26] Lane (1986).Lane,G.A (1989). Phase change thermal storage materials in: hand book of thermal design in:Guyer,C,ed McGraw hill book Co.
- [27] M. K. Rathodet J. Banerjee, "Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 18, pp. 246-258, Feb.2013.
- [28] Y. Yuan, N. Zhang, W. Tao, X. Cao, et Y. He, "Fatty acids as phase change materials: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 29, pp. 482-498, Jan.2014.
- [29] K. Muraishi, Y. Suzuki, et A. Kikuchi, "Kinetics of the thermal decomposition of dicarboxylic acids", ThermochimicaActa, vol. 239, no. 0, pp. 51-59, July1994.
- [30]SAMSSA Newsletter, "Sugar Alcohol based Materials for Seasonal Storage Applications", 2015.
- [31] A. Kaizawa, N. Maruoka, A. Kawai, H. Kamano, T. Jozuka, T. Senda, et T. Akiyama, "Thermophysical and heat transfer properties of phase change material candidate for waste heat transportation system", Heat Mass Transfer, vol. 44, no. 7, pp. 763-769, 2008.
- [32] A. Kaizawa, N. Maruoka, A. Kawai, H. Kamano, T. Jozuka, T. Senda, et T. Akiyama, "Thermophysical and heat transfer properties of phase change material candidate for waste heat transportation system", Heat Mass Transfer, vol. 44, no. 7, pp. 763-769, 2008.
- [33] A. Gil, C. Barreneche, P. Moreno, C. Solé, A. Inés Fernandez, et L. F. Cabeza, "Thermal behaviour of d-mannitol when used as PCM: Comparison of results obtained by DSC and in a thermal energy storage unit at pilot plant scale", Applied Energy, vol. 111, pp. 1107-1113, Nov.2013.
- [34] A. Solé, H. Neumann, S. Niedermaier, I. Martorell, P. Schossig, et L. F. Cabeza, "Stability of sugar alcohols as PCM for thermal energy storage", Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 126, no. 0, pp. 125-134, July2014.
- [35] D. Laing, C. Bahl, T. Bauer, D. Lehmann, et W. D. Steinmann, "Thermal energy storage for direct steam generation", Sol. Energy, vol. 85, no. 4, pp. 627-633, 2011.
- [36] www.rubitherm.eu consulté le : 25/05/2018

ملخص

يعد التخزين الحراري لتغيير الطور تقنية مبتكرة و واعدة لتوفير الطاقة. إنها من إحدى المجالات الجديدة للبحث. الخطوة الأولى في هذا العمل هي بناء مقعد لتجارب البارافين المختلفة. تم تطوير واجهة قياس باستخدام برنامج LabVIEW لإدارة القياسات التجريبية. تركز الخطوة الثانية على تحسين عملية ذوبان البارافين مع إضافة مواد أخرى ذات موصلية حرارية عالية.

Résumé

Le stockage thermique par changement de phase est une technologie innovante et prometteuse en matière d'économie de l'énergie. Il fait partie des nouveaux domaines de recherche. La première étape de ce travail consiste à fabriquer un banc pour réaliser différentes expériences sur la fusion de la paraffine. Une interface de mesure est développée avec LabVIEW pour la gestion de mesures expérimentales. La seconde étape s'articule sur l'amélioration du processus de changement de phase de la paraffine tout en ajoutant d'autres matériaux à conductivité thermique élevée.

Abstract

Phase change thermal storage is an innovative and promising technology for saving energy. It is one of the new areas of research. The first step in this work is to build a bench for different paraffin experiments. A measurement interface is developed with LabVIEW for the management of experimental measurements. The second step focuses on improving the paraffin phase change process while adding other materials with high thermal conductivity.