



Centre de recherche, de développement et de transfert technologique acéricole inc.

Siège social et station expérimentale
142, rang Lainesse
Saint-Norbert d'Arthabaska, QC
G0P 1B0
Tél. 819 369-4000
Fax. 819 369-9589

RAPPORT FINAL

Mesure des propriétés physicochimiques et thermodynamiques des concentrés de sève d'érable

Par :

Jessica Houde, Ing.

Mélissa Cournoyer

Carmen Charron

Fadi Ali, Ing. Ph. D

 PARTENARIAT
CANADIEN pour
l'AGRICULTURE

Canada Québec 

Ce projet a été financé par l'entremise du Programme de partenariat pour l'innovation en agroalimentaire, en vertu du Partenariat canadien pour l'agriculture, entente conclue entre les gouvernements du Canada et du Québec.

Toute information contenue dans ce document est la propriété du Centre ACER.

Cette information ne peut pas être utilisée, reproduite ou transmise sans l'autorisation écrite du Centre ACER, à moins que ce ne soit pour usage personnel et non commercial. Lorsque de l'information issue de ce rapport est utilisée, reproduite ou transmise à une tierce personne, pour toute fin autorisée, il doit être clairement indiqué sur les documents utilisés, reproduits ou transmis que cette information est la propriété du Centre ACER.

RÉSUMÉ

Le concentré de sève est un fluide dont les propriétés varient en fonction de sa concentration et de sa température. Son utilisation en procédé nécessite souvent des calculs propres à ses caractéristiques. Faute d'informations suffisantes, les données pour des solutions de saccharose sont généralement utilisées à cette fin. Pour obtenir un meilleur portrait de ce liquide, des mesures de masse volumique, viscosité, conductivité thermique, capacité thermique et activité de l'eau ont été réalisées sur différents échantillons de concentrations différentes. Les résultats ont été comparés avec des solutions de référence (saccharose) à des températures comparables aux essais. L'utilisation de solutions références d'eau et de saccharose comparées à leur valeur théorique a d'abord permis d'établir si la méthode de mesure utilisée pour chaque instrument était suffisamment précise. Ensuite, il a été possible de confirmer que les valeurs de référence pour le saccharose sont suffisamment près de celles du concentré de sève pour être valables dans les calculs reliés au domaine acéricole. Finalement, les données expérimentales obtenues pour les concentrés de sève ont pu être utilisées pour extrapoler des tables de référence et des modèles mathématiques permettant d'estimer ces paramètres en fonction de la concentration (6 à 35 °Brix) et de la température appliquée (10 et 20 °C). Ces modèles devraient toutefois être revalidés avec un plus grand échantillonnage.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	3
TABLE DES MATIÈRES.....	4
INTRODUCTION	5
OBJECTIFS.....	6
MÉTHODOLOGIE.....	7
ÉCHANTILLONNAGE.....	7
MASSE VOLUMIQUE.....	2
VISCOSITÉ.....	2
CONDUCTIVITÉ THERMIQUE.....	3
CAPACITÉ THERMIQUE.....	3
ACTIVITÉ DE L'EAU.....	4
RÉSULTATS ET DISCUSSION	4
MASSE VOLUMIQUE.....	4
VISCOSITÉ.....	8
CONDUCTIVITÉ THERMIQUE.....	13
CAPACITÉ THERMIQUE.....	18
ACTIVITÉ DE L'EAU.....	21
CONCLUSION	25
REMERCIEMENTS.....	26
BIBLIOGRAPHIE	26
ANNEXE	29

INTRODUCTION

La sève d'érable et ses concentrés correspondants possèdent des caractéristiques qui en font un produit unique. Les propriétés physicochimiques et thermodynamiques de la sève d'érable se rapprochent de celles d'une solution de saccharose, sans être identiques, vu sa composition plus complexe. La concentration de la sève par osmose inverse jusqu'à des niveaux élevés entraîne une augmentation des concentrations de différents composants tels que des ions minéraux et des acides organiques. La composition des concentrés est donc différente des solutions de saccharose à des °Brix comparables, ce qui pourrait signifier une différence importante au niveau de ses propriétés physicochimiques et thermodynamiques. Le design et la conception des différents équipements utilisés en acériculture pour la transformation de sève en sirop d'érable et en produits dérivés sont basés sur ces propriétés. À ce jour, les données sur les concentrés de sève étant très limitées, les équipementiers, transformateurs et intervenants du milieu se basent sur les propriétés des solutions de saccharose pour réaliser leurs calculs, ce qui risque de fausser la performance obtenue lors de l'utilisation de concentrés de sève. L'industrie acéricole est un milieu en évolution, où de nouvelles générations d'équipements sont conçues et introduites de façon à améliorer les rendements de production. Dans ce contexte, il semble important de vérifier si les propriétés des solutions de saccharose sont suffisamment près de celles du concentré de sève pour être valables dans les calculs du domaine acéricole. En outre, les résultats obtenus pourront permettre de développer une base de données de références sur les propriétés des matières premières utilisées pour la fabrication des produits de l'érable. Cette base de données fournira à l'industrie des informations supplémentaires adaptées pour la sève d'érable et ses produits dérivés, tel qu'on le retrouve déjà dans d'autres domaines alimentaires.

OBJECTIFS

La première phase de ce projet consiste à fournir des données de bases sur les propriétés des concentrés de sève. Ces derniers ont été évalués au niveau de leurs propriétés physicochimiques et thermodynamiques. Les propriétés suivantes ont été ciblées en fonction des conditions d'utilisation du milieu acéricole :

- Masse volumique : Permet de déterminer les variations de cette propriété sous les conditions d'utilisation et ainsi prévoir leurs effets sur la fluidité des concentrés et sur les transferts de matière et de chaleur dans ces concentrés.
- Viscosité : Permet de caractériser la fluidité (résistance au mouvement), la rhéologie et la turbulence des concentrés de sève lors de leurs traitements sous diverses conditions.
- Conductivité thermique : Permet de prévoir la capacité des concentrés à transférer la chaleur; un paramètre important pour le chauffage des concentrés et l'évaporation de l'eau.
- Capacité thermique : Permet de déterminer la quantité de chaleur nécessaire pour chauffer une masse de concentré d'un degré. Cette mesure permet d'estimer exactement la chaleur nécessaire pour le chauffage du concentré jusqu'à l'ébullition.
- L'activité d'eau : Cette propriété est importante afin de déterminer le niveau de fragilité des concentrés à la prolifération des microorganismes et les moyens techniques nécessaires pour stabiliser leur qualité durant l'entreposage
- Pression osmotique : permet de déterminer la pression minimale à appliquer pour concentrer la sève à un certain degré Brix. Cette mesure n'a finalement pas pu être réalisée faute de trouver un instrument adéquat pour la réaliser.

MÉTHODOLOGIE

ÉCHANTILLONNAGE

Dans le cadre de cette étude, 39 échantillons de concentré de sève, généralement de mi-saison et variant de 6 à 35 °Brix, ont été prévus. Dû aux restrictions liées à la pandémie de COVID-19, il a été impossible d'effectuer des prélèvements chez des producteurs dans diverses régions du Québec. Des échantillons de l'année 2020 et 2021 ont été prélevés à l'érablière expérimentale du Centre ACER ainsi que chez un producteur de la même région pour l'année 2021. Afin d'obtenir un nombre représentatif convenable d'échantillons, des concentrés de sève prélevés au cours de l'année 2017 ont également été utilisés. Ceux-ci provenaient de 11 producteurs différents (Bas-Saint-Laurent, Centre-Du-Québec, Estrie, Chaudière-Appalaches, Capitale-Nationale, Laurentides, Lanaudière). Tous ces échantillons ont été conservés congelés jusqu'à leur utilisation.

Tableau 1 – Descriptif sommaire des échantillons utilisés (concentration et année de récolte)

Concentration	Nombre d'échantillons (n)
6,5 à 10,5 °Brix	5
10,6 à 15,5 °Brix	9
15,6 à 20,5 °Brix	9
20,5 à 25,5 °Brix	6
25,6 à 30,5 °Brix	3
30,6 à 35,6 °Brix	7
Total	39

Année de récolte	Nombre d'échantillons (n)
2017	22
2020	9
2021	8

MASSE VOLUMIQUE

La masse volumique a été déterminée en utilisant un densimètre portatif (DensitoPro, Mettler-Toledo GmbH, Suisse). Une moyenne de quatre lectures sur deux aliquotes différentes a été réalisée. L'échantillon de concentré était d'abord placé dans un bain thermostaté (RMS 6, MGM Lauda, Allemagne), ajusté à environ 8°C, pour sa décongélation ainsi que sa conservation avant l'analyse. Un rinçage de l'appareil a été effectué en aspirant et rejetant, deux fois de suite, le concentré fraîchement agité. À la troisième prise, la lecture a été notée lors du réchauffement du concentré dans l'appareil, soit à 10 et 15°C (température indiquée par le densimètre). Après l'atteinte de la lecture à 15°C, l'échantillon était disposé et une nouvelle prise était effectuée. En effet, comme l'atteinte de la troisième température de lecture requise (20°C) était trop longue, cette dernière a été effectuée dans un deuxième temps. Ainsi, une fois les mesures à 10 et 15°C terminées, l'échantillon était placé dans de l'eau plus chaude pour atteindre entre 17 et 19°C. Une prise était alors effectuée et la lecture prise lorsque la température atteint 20°C. Une deuxième lecture était ensuite effectuée. Entre les échantillons, l'appareil était rincé deux fois avec de l'eau déionisée.

VISCOSITÉ

La viscosité a été analysée avec un viscosimètre DV2TLV (Brookfield Engineering Laboratories, inc. USA) équipé d'un adaptateur pour petits échantillons, composé d'une chambre d'échantillon cylindrique avec une chemise d'écoulement, dont la température peut être contrôlée par circulation d'eau (ici avec un bain thermostaté (RMS 6, MGM Lauda, Allemagne), ajusté à 10°C ou 20°C). La broche #18 a été utilisée lors des mesures, celle-ci permet de réaliser des lectures entre 3 et 10 000 cP. Ces intervalles sont supérieurs à ceux attendus dans le concentré sève, mais cette broche a été utilisé tout de même, car celle qui aurait permis des mesures inférieures à 3 cP n'était pas disponible. L'échantillon de concentré était d'abord placé dans le même bain que celui alimentant la chemise du viscosimètre, pour sa décongélation ainsi que sa conservation avant l'analyse. La chambre ainsi que la broche y étaient également placées afin de conserver, le plus précisément possible, la température de l'échantillon. L'appareil a été programmé avec une rotation à 60 rpm, un intervalle de mesure de 10 secondes et une moyenne chaque minute. La lecture finale correspondait à la moyenne de la 2^e minute. Un volume d'échantillon de 8 ml était

transféré dans la chambre pour la lecture. Une fois celle-ci effectuée, l'échantillon était disposé, la chambre et la broche rincées à l'eau déionisée et essuyées, puis un nouvel échantillon, provenant du même tube, était transféré dans la chambre (la chambre et la broche propres étaient tempérées dans le bain avant la deuxième lecture).

CONDUCTIVITÉ THERMIQUE

La conductivité thermique a été mesurée avec l'appareil KD2 Pro muni de la sonde KS-1 (Decagon Devices inc., USA). Une moyenne de deux lectures sur deux aliquotes différentes a été réalisée. L'échantillon a été transféré afin de remplir presque entièrement un tube de verre (16x100 mm) en borosilicate, soit approximativement 18 ml. Le tube a été fermé avec un bouchon de type caoutchouc afin de pouvoir y insérer et positionner la sonde bien au centre du tube. L'échantillon a ensuite été placé dans un bain thermostaté (Polystat, Cole-Parmer, USA). Une fois l'échantillon tempéré à la température requise, soit 10° ou 20°C, la sonde, préalablement tempérée à la température d'analyse (tube d'eau déminéralisée au moins 15 minutes), a été introduite dans le tube. Une fois insérée, un temps d'attente a été respecté pour chaque température avant d'effectuer une lecture. Pour le 10°C, ce temps d'attente était de 4 minutes et pour le 20°C de 2.5 minutes. Entre chaque échantillon, la sonde a été convenablement essuyée et insérée immédiatement dans l'échantillon suivant.

CAPACITÉ THERMIQUE

La capacité thermique devait être mesurée à l'aide d'un DSC Discovery Q200 (TA Instruments). Des essais préliminaires ont été réalisés sur des échantillons d'eau potable et de concentré à 35,6 °Brix. Les essais ont été réalisés en triplicata comme recommandé par la méthode ASTM E1269 (Schumand, 2020). Le taux de chauffage a été ajusté à 7 °C/min comme recommandé dans la littérature (Darros-Barbosa et al. 2003). Les essais ont été réalisés entre 5 et 67,5°C. Les échantillons pesaient en moyenne 0,01297g (concentré) et 0,01339 g (eau).

ACTIVITÉ DE L'EAU

L'activité de l'eau (a_w) a été mesurée à l'aide d'un AquaLab, CX-2 (Decagon Devices inc., USA). Un volume d'environ 5 ml de concentré a été utilisé. 4 lectures ont été effectuées à température pièce après stabilisation dans l'appareil (autour de 23-24°C). Le volume utilisé provenait du rejet du densimètre après la mesure de la masse volumique à 20°C.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

MASSE VOLUMIQUE

Afin de vérifier les mesures obtenues expérimentalement, des lectures ont été effectuées sur de l'eau et des solutions de saccharose à différentes concentrations. Ces lectures ont ensuite été comparées aux valeurs de référence. Le Tableau 2 démontre la fiabilité des résultats obtenus. Ceux-ci sont très près des valeurs de référence (<0,2%), indiquant que la méthode de mesure réalisée est suffisamment près de la réalité pour être valable. Il est à noter que la précision de mesure de l'instrument est de $\pm 0,001 \text{ g/cm}^3$ (Annexe 1), ce qui pourrait expliquer les variations obtenues.

Tableau 2 - Comparaison des valeurs de masse volumique de référence et mesurées pour l'eau et des solutions de saccharose.

Matrice		T (°C)	Valeur de référence ¹ (g/cm ³) (Réf)	Valeur mesurée (g/cm ³) (Exp)	N	% écart Réf – Exp
Eau déionisée		24	0,9973	0,9972 $\pm$ 0,0002	8	0,01%
Solution de saccharose	10%	20	1,0400	1,0378	1	0,2%
	20%		1,0829	1,0805 $\pm$ 0,0003	5	0,2%
	40%		1,1785	1,1773 $\pm$ 0,0025	4	0,1%

¹ Engineering Toolbox (2014) ; Engineering Toolbox (2017) ; Handbook of chemistry (2008)

Les résultats de masse volumique du concentré ont pu être comparés pour différents intervalles de concentration et de température. Les moyennes calculées au Tableau 3 permettent d'observer de petites variations entre les niveaux de °Brix et les températures testées. Dans tous les cas, la masse volumique diminue avec l'augmentation de la température, mais augmente avec la concentration en °Brix. Ces observations sont bien visibles à la

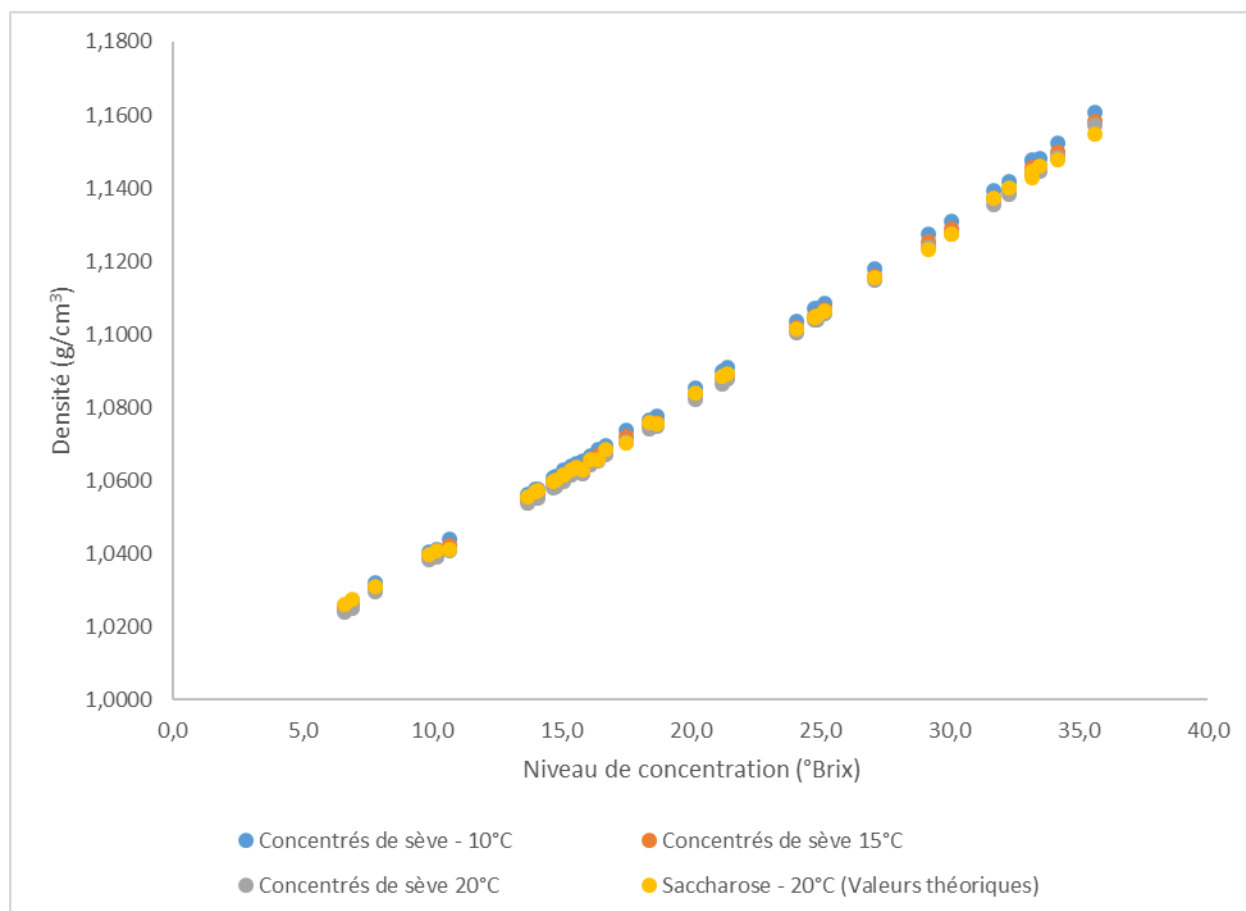
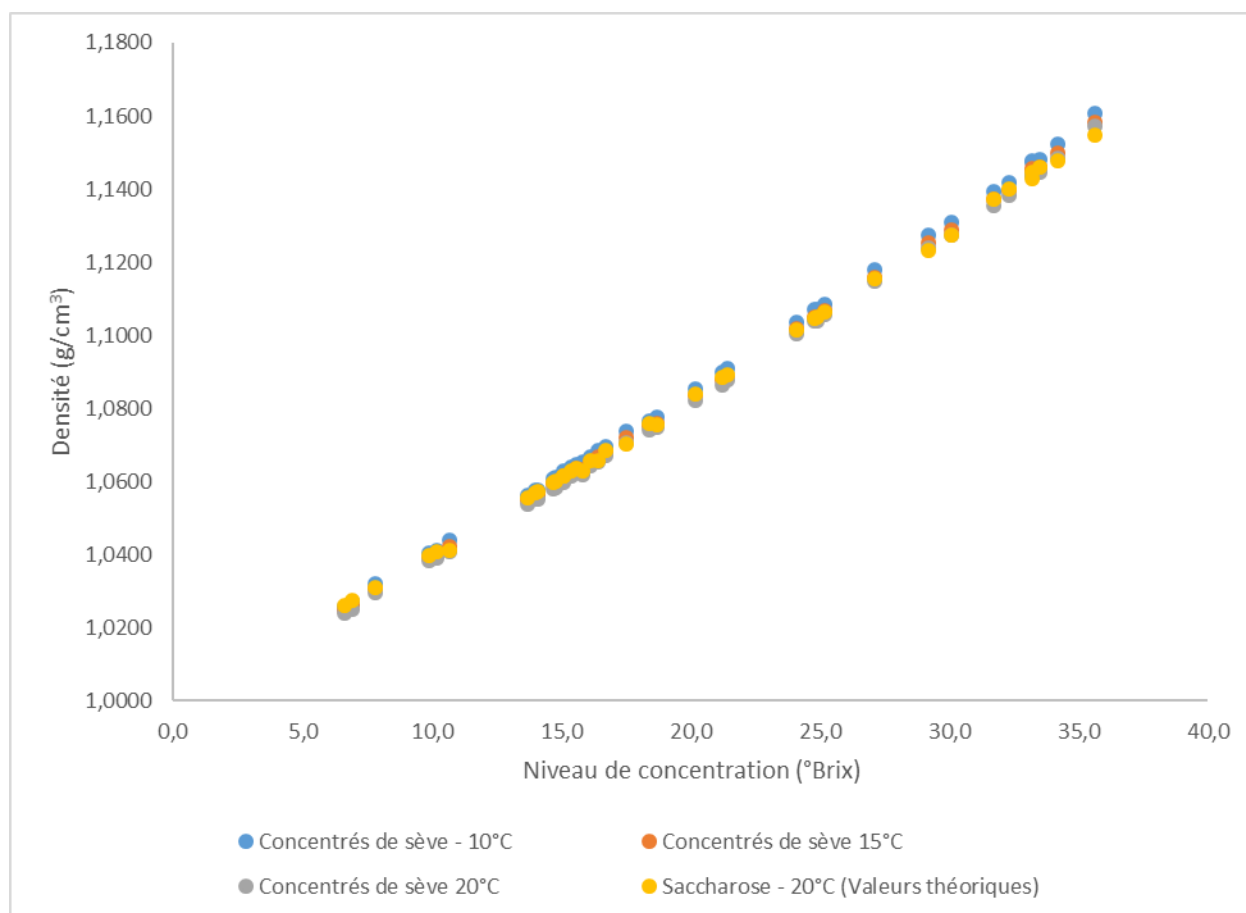


Figure 1, où l'on peut de surcroît comparer les valeurs de référence pour le saccharose à 20 °C (Engineering ToolBox 2017, Handbook of chemistry 2008). La différence calculée pour les valeurs de concentré comparativement aux valeurs théoriques de saccharose à 20 °C est en moyenne de $0,097\% \pm 0,088$. Ce résultat indique une très faible différence entre les deux matrices. À la lumière de résultats obtenus, la différence est tellement faible, qu'on peut considérer que les tables de référence et équations du saccharose sont valables pour le concentré de sève. De plus, les valeurs obtenues à différentes températures sont tellement près l'une de l'autre, qu'on peut considérer minime l'effet de la température. L'équation généralement utilisée dans le domaine acéricole (Allard 1999), basée sur une solution de sucre à 20 °C, demeure donc adéquate pour les calculs réalisés en érablère.

Tableau 3 – Résultats moyens de masse volumique à différents intervalles de concentration

Intervalle de concentration (°Brix)	Valeur expérimentale moyenne (g/cm ³)		
	10 °C	15 °C	20 °C
6,6 à 10,7	1,035 ± 0,0078	1,034 ± 0,0076	1,033 ± 0,0075
13,7 à 20,2	1,066 ± 0,0079	1,065 ± 0,0079	1,064 ± 0,0078
21,2 à 27,1	1,104 ± 0,0101	1,102 ± 0,0100	1,100 ± 0,0101
29,2 à 35,6	1,144 ± 0,0104	1,142 ± 0,0103	1,140 ± 0,0103

**Figure 1 – Masses volumiques moyennes mesurées en laboratoire**

Malgré le fait que les résultats entre le concentré et le saccharose sont très près l'un de l'autre, les résultats obtenus pour le concentré aux trois températures ont été utilisés afin de déterminer une équation tenant compte à la fois de la température et du degré Brix de l'échantillon. Pour ce faire, une régression linéaire à 2 facteurs a été réalisée. L'équation obtenue est de la forme suivante :

$$\text{Masse volumique} = (-2,90705 \times 10^{-4} \times \text{Température (°C)}) + (4,56821 \times 10^{-3} \times \text{°Brix}) + 0,996893303$$

La régression linéaire a montré un coefficient de détermination multiple de 0,999, ce qui signifie que l'équation s'applique bien aux données. Pour s'assurer de sa cohérence, celle-ci a été utilisée pour recalculer la valeur théorique des échantillons analysés et comparer les résultats aux données expérimentales. L'écart obtenu est en moyenne de 0,01 % $\pm$ 0,001, indiquant une bonne corrélation de la formule avec les données obtenues. La formule a donc été utilisée pour préparer un tableau de référence (Tableau 4) pour le concentré entre 6 et 36 °Brix, pour des températures de 10, 15 et 20 °C en comparaison avec les données théoriques du saccharose à 20 °C (Engineering ToolBox 2017, Handbook of chemistry 2008).

Tableau 4 – Masse volumique (g/cm³) du concentré de sève selon la température et le niveau de concentration en comparaison avec la valeur théorique pour le saccharose

Masse volumique (g/cm ³)		Concentré de sève			Saccharose ²
		Température (°C)			
		10	15	20	20
Concentration (°Brix)	6	1,0214	1,0199	1,0185	1,0218
	8	1,0305	1,0290	1,0276	1,0299
	10	1,0396	1,0382	1,0367	1,0381
	12	1,0487	1,0473	1,0458	1,0465
	14	1,0579	1,0564	1,0550	1,0549
	16	1,0670	1,0655	1,0641	1,0635

² Engineering ToolBox (2017) ; Handbook of chemistry (2008)

18	1,0761	1,0747	1,0732	1,0722
20	1,0852	1,0838	1,0823	1,0810
22	1,0944	1,0929	1,0914	1,0899
24	1,1035	1,1020	1,1006	1,0990
26	1,1126	1,1112	1,1097	1,1082
28	1,1217	1,1203	1,1188	1,1175
30	1,1309	1,1294	1,1279	1,1270
32	1,1400	1,1385	1,1371	1,1366
34	1,1491	1,1476	1,1462	1,1464
36	1,1582	1,1568	1,1553	1,1562

VISCOSITÉ

La mesure de viscosité a tout d'abord été réalisée sur des échantillons d'eau et de solutions de saccharose de façon à réaliser des mesures de référence sur l'appareil. Les résultats obtenus au Tableau 5 permettent de statuer sur la précision de la méthode de mesure. Les résultats à l'eau ont démontré un écart entre 36 et 41% pour l'eau, et ceux avec des solutions de saccharose de 12 à 45%, ce qui est très grand et démontre une déviation de la méthode par rapport à la réalité. En effet, les résultats obtenus de façon expérimentale sont supérieurs à la réalité. Il est à noter que la précision de mesure l'instrument est de $\pm 1\%$ (Annexe 1).

Tableau 5 - Comparaison des valeurs de viscosité de référence et mesurées pour l'eau et des solutions de saccharose

Matrice		T (°C)	Valeur de référence ³ (cP) (Réf)	Valeur mesurée (cP) (Exp)	N	% écart Réf – Exp
Eau déionisée		10	1,308	1,78 $\pm$ 0,08	2	36%
		20	1,002	1,41 $\pm$ 0,07	4	41%
Solution de	10%	10	1,61	2,30 $\pm$ 0,15	2	43%

³ Handbook of chemistry (2008) ; V.R.N. Telis et al (2007)

saccharose		20	1,26	$1,83 \pm 0,08$	2	45%
	20%	10	2,68	$3,00 \pm 0,00$	3	12%
		20	1,96	$2,49 \pm 0,06$	7	27%

Les mesures de concentrés ont été mesurées en duplicata, et la moyenne de celle-ci a été utilisée pour le traitement des données. Pour ces duplicata, le coefficient de variation a varié entre 0 et 9%, montrant une forte variation expérimentale qui risque d'affecter les tendances et équations obtenues. Après évaluation des résultats, il a été constaté que l'équipement utilisé pour réaliser cette mesure est conçu pour mesurer des échantillons dont la viscosité minimum est de 3 CP. Les données inférieures à 3 CP ne peuvent donc pas être considérées comme précises. Les résultats du

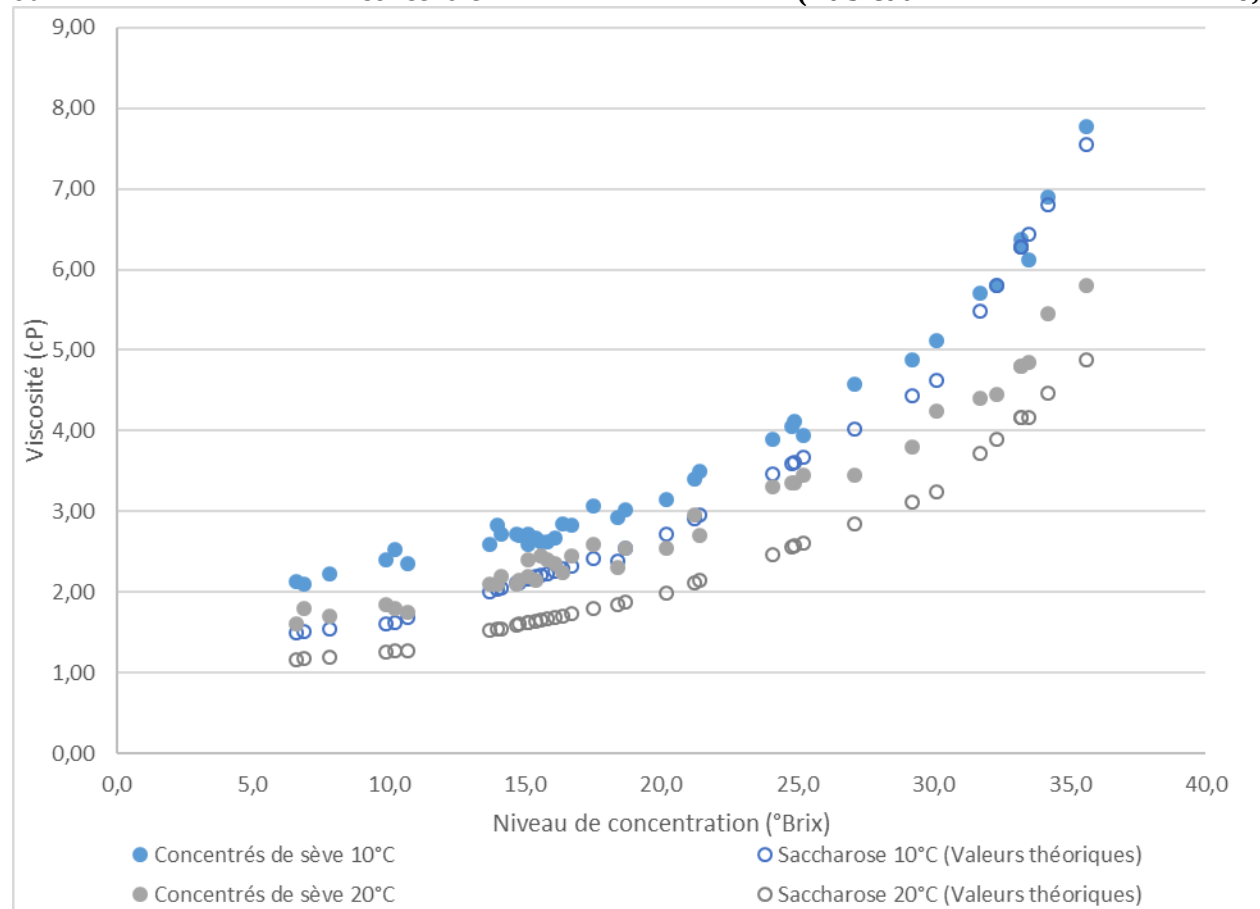


Figure 2) permettent d'ailleurs de constater que l'erreur diminue lorsque les lectures s'approchent de la valeur minimale de 3 CP. Il apparaît donc que les résultats en dessous de 3 CP

sont surestimés comparativement à la valeur de référence, signifiant que la méthode utilisée n'est pas adaptée pour les solutions de plus faible concentration, comme c'est le cas pour les échantillons du projet. Cela confirme que la broche utilisée pour faire la mesure n'était pas adaptée au besoin du projet.

Tableau 6 – Résultats moyens de viscosité (cP) à différents intervalles de concentration

Intervalle de concentration (°Brix)	Valeur expérimentale moyenne (cP)	
	10 °C	20 °C
6,6 à 10,7	2,288 ± 0,1664	1,779 ± 0,1066
13,7 à 20,2	2,785 ± 0,1703	2,278 ± 0,1510
21,2 à 27,1	3,929 ± 0,3949	3,186 ± 0,2322
29,2 à 35,6	6,106 ± 0,8841	4,664 ± 0,5770

Même si la broche de l'équipement utilisé n'était pas adaptée en dessous de 3 cp, les données obtenues ont été analysées afin de voir si une concordance pouvait tout de même être réalisée. Il est possible de constater une augmentation de la viscosité avec l'augmentation de la concentration (Tableau 6). En effet, un concentré plus élevé en °Brix présente également une viscosité plus élevée, et ce, peu importe la température appliquée. Dans tous les cas, la viscosité diminue avec la température, comme attendu, puisqu'une solution chaude est toujours plus fluide

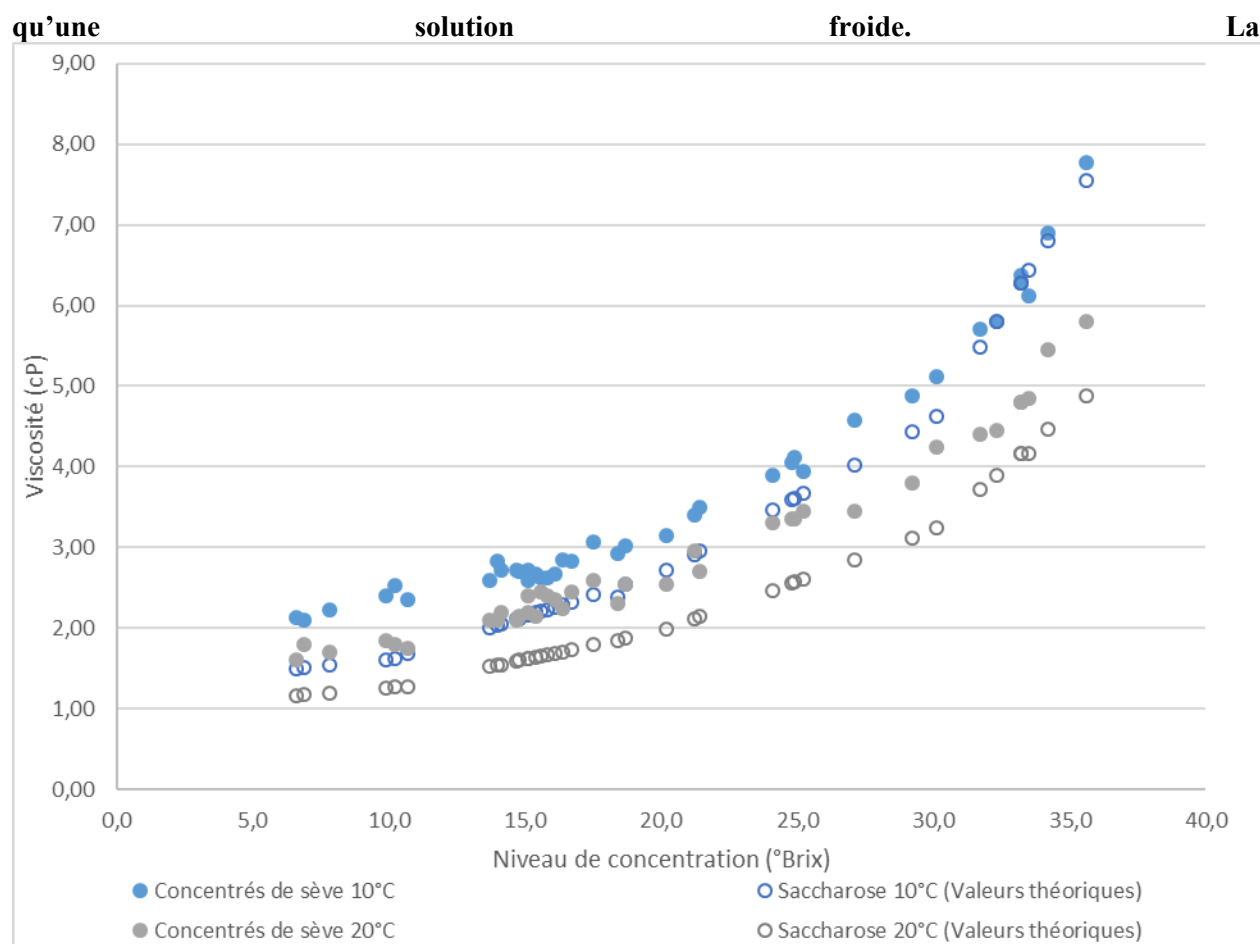


Figure 2 permet de bien visualiser ces résultats, tout en les comparant avec des valeurs de référence pour le saccharose à 10 et à 20 °C (Handbook of chemistry 2008, CEDUS, ISCOTABLES 7th ed.). Bien qu'un écart est visible entre le concentré de sève et le saccharose, le fait que la méthode ne soit pas adaptée pour les lectures en dessous de 3 CP ne permet pas de statuer à ce niveau. Dans ces circonstances, les données de références existantes pour le saccharose semblent être les plus adaptées actuellement pour des calculs ultérieurs.

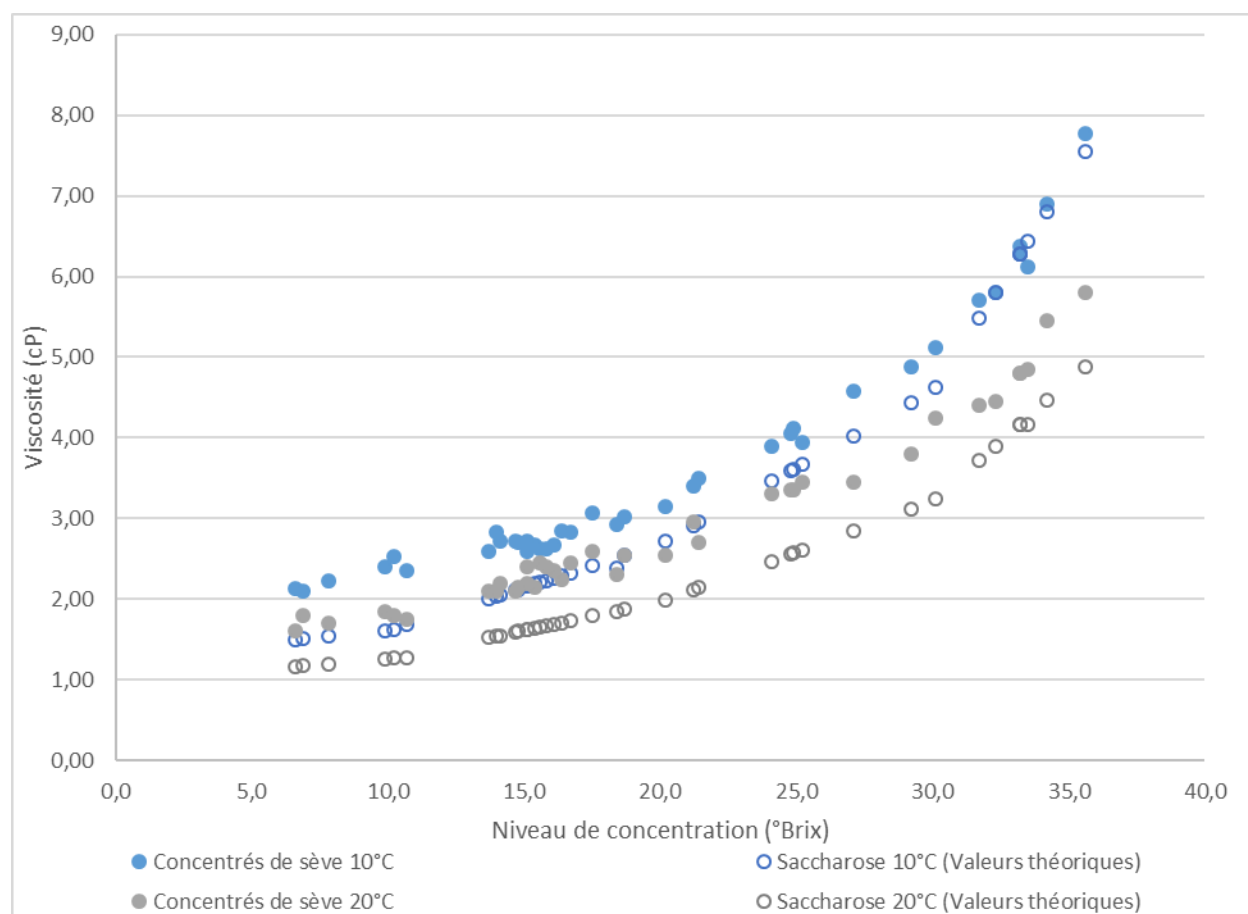


Figure 2 – Viscosités moyennes mesurées en laboratoire

Malgré les résultats obtenus, les données du concentré ont été traitées afin de déterminer si un modèle pouvait être appliqué. Des équations polynomiales à deux degrés pour chaque température ont pu être extrapolées des courbes de résultats (Tableau 7), avec des coefficients de détermination R^2 de 0,98. L'écart entre les données mesurées et calculées avec ces équations est de $0,17\% \pm 0,05$ pour 10°C et de $1,4\% \pm 0,038$ pour 20°C . Cela nous indique que le modèle semble un peu plus fiable à 10°C qu'à 20°C . Ce résultat peut être relié au fait que la viscosité est plus élevée à basse température, et se rapproche donc plus de la limite de 3 CP de l'équipement.

Ces équations ne permettant pas d'intégrer la variable de température, un second calcul a été réalisé. L'une des méthodes standard pour calculer la viscosité de fluides est via l'équation d'Arrhenius, où $\ln \text{viscosité} = \ln V_0 + E_a/R(1/T)$ (Messaâdi et al, 2015). En utilisant les données expérimentales pour tracer le graphique du logarithme naturel ($\ln$) de la viscosité en

fonction de $1/T$, il est possible d'obtenir une équation avec régression linéaire donnant la pente (E_a/R) et $\ln V_0$ (Ordonnée à l'origine). Dans le cas qui nous intéresse, nous avons également corrélé ces informations avec le °Brix pour réaliser une régression linéaire à 2 facteurs. Cela a permis d'obtenir une équation dont le coefficient de détermination multiple est de 0,989 (Tableau 7). L'écart entre les données expérimentales et celles calculées via cette méthode est en moyenne de $0,15\% \pm 0,05$. Cette formule présente donc un bon potentiel, et présente moins de variation que l'équation polynomiale déterminée à 20 °C. Cette dernière devrait toutefois être réévaluée avec une méthode de mesure adaptée aux viscosités inférieures à 3 cp.

Tableau 7 – Équation obtenue des graphiques de viscosité

Méthode de calcul	Fluide - Température	Équation	Coefficient de détermination (R2)
Polynomiale à 2 facteurs	Concentré – 10 °C	Viscosité (CP) = $0,0064 \times \text{°Brix}^2 - 0,1067 \times \text{°Brix} + 2,7766$	0,9857
	Concentré – 20 °C	Viscosité (CP) = $0,0037 \times \text{°Brix}^2 - 0,0285 \times \text{°Brix} + 1,776$	0,9819
Régression linéaire du logarithme naturel	Concentré – 10 à 20 °C	Viscosité (CP) = $\text{EXP}((-2,25 \times 10^{-2} \times \text{Température (°C)}) + (4,18 \times 10^{-12} \times \text{°Brix}) + 0,616)$	0,989

L'obtention des paramètres de l'équation d'Arrhenius a également été réalisée telle que décrite dans la littérature (Zuritz et al 2004). Dans un premier temps, les données ont été regroupées en moyenne pour différents niveaux de concentration similaires. Les résultats pour chaque moyenne de °Brix ont permis de réaliser des graphiques de $\ln$ viscosité en fonction de $1/\text{température (K)}$. À partir de ces graphiques, il est théoriquement possible d'obtenir les paramètres manquants de l'équation d'Arrhenius. En effet, la pente de chaque équation correspond à E_a/R , alors que

l'ordonnée à l'origine correspond à $\ln A_s$. Les pentes obtenues ont permis de calculer l'énergie d'activation entre 0,007 et 0,014 kcal/mol pour tous les niveaux de concentration. Chaque paramètre obtenu a été corrélé via son logarithme naturel en graphique par rapport au niveau de concentration (°Brix) pour obtenir une équation. Les courbes obtenues sont visibles à la Figure 3.

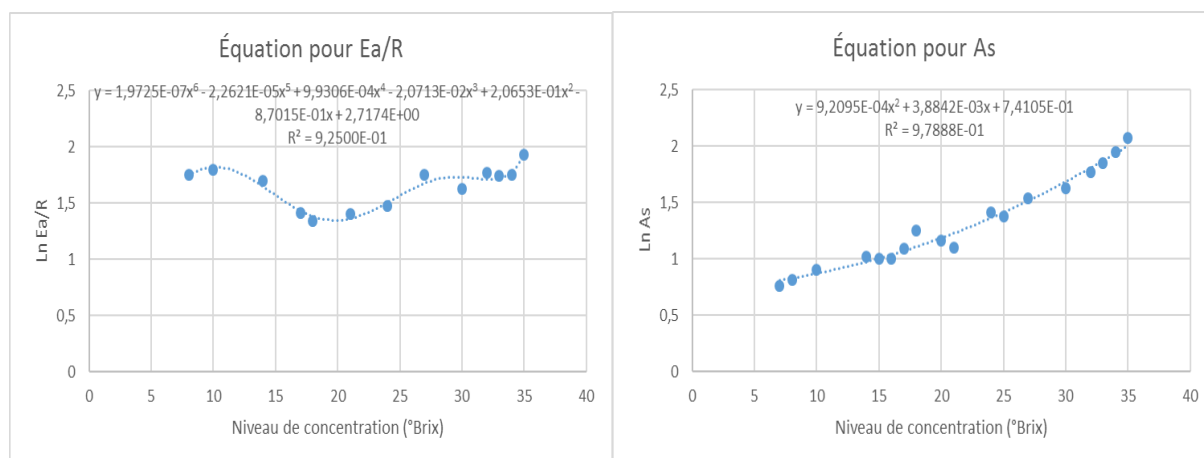


Figure 3 – Détermination graphique des paramètres applicables à la l'équation d'Arrhenius

Les équations obtenues ont été utilisées avec l'équation d'Arrhenius pour calculer la viscosité selon chaque concentration et température. Les résultats à 10°C ont donné des valeurs qui se rapprochaient des données expérimentales en moyenne de 1%. Par contre, ceux à 20°C ont donné des écarts moyens de 26% par rapport aux valeurs expérimentales. Ces écarts sont fort probablement reliés à la variabilité de la méthode de mesure. Cette méthode semble donc pouvoir être potentiellement appliquée aux concentrés de sève, à condition d'utiliser une méthode expérimentale plus précise pour des valeurs en dessous de 3 CP. En effet, la répartition des données obtenues de cette façon présente beaucoup de variabilité lors des calculs des paramètres E_a/R et A_s , ce qui rend difficile l'interpolation d'une équation à partir d'une courbe. Les données calculées via cette méthode ne sont donc pas présentées, puisqu'elles sont considérées comme trop éloignées de la réalité. Cette méthode présente donc un potentiel intéressant, mais qui devrait être validé avec une méthode de mesure mieux adaptée pour les viscosités inférieures à 3 cp.

Vu les résultats obtenus, la variabilité et le manque de précision de la méthode, il a été décidé de ne pas présenter de tables de références obtenues à partir des équations déterminées. Les données

calculées présentent des écarts trop importants pour pouvoir être utilisées avec certitudes dans des calculs de dimensionnements d'équipements acéricoles. Une méthode de mesure mieux adaptée devrait être mise en place pour s'assurer de développer des équations les plus près de la réalité possible. À défaut d'informations plus précises, les tables de références pour le saccharose semblent être adéquates pour les besoins acéricoles.

CONDUCTIVITÉ THERMIQUE

Les mesures expérimentales réalisées avec du glycérol et des solutions de saccharose pour la conductivité thermique ont présenté un écart entre 0,2 et 4% comparativement aux données théoriques. Les données du Tableau 8 permettent de constater que cet écart semble plus prononcé à 20 °C. Il est donc possible que les données obtenues lors de l'analyse du concentré soient moins précises à cette température. Il est à noter que la précision de mesure l'instrument est de $\pm 0,5$ % pour l'intervalle de lecture obtenu (Annexe 1).

Tableau 8 - Comparaison des valeurs de conductivité thermique de référence et mesurées pour le glycérol et des solutions de saccharose

Matrice		T (°C)	Valeur de référence ⁴ (W/m.K) (Réf)	Valeur mesurée (W/m.K) (Exp)	N	% écart Réf – Exp
Glycérol		10		0,285 $\pm$ 0,002	3	
		20	0,286	0,285 $\pm$ 0,001	2	0,3%
Solution de saccharose	10%	10	0,559	0,560	1	0,2%
		20	0,566	0,586 $\pm$ 0,018	6	4%
	20%	10	0,528	0,530 $\pm$ 0,001	2	0,4%
		20	0,535	0,551 $\pm$ 0,002	2	3%
	40%	10	0,464	0,466 $\pm$ 0,000	2	0,4%
		20	0,470	0,471 $\pm$ 0,003	2	0,2%

⁴ Cengel (2007) ; Handbook of chemistry (2008) ; Mohos (2010)

Les résultats de conductivité thermique obtenus pour le concentré montrent que ce paramètre diminue avec la concentration en °Brix (Tableau 9). De plus, une température plus élevée signifie également des valeurs plus élevées. Il est possible d'observer que les valeurs théoriques pour le saccharose sont plus faibles que pour les concentrés

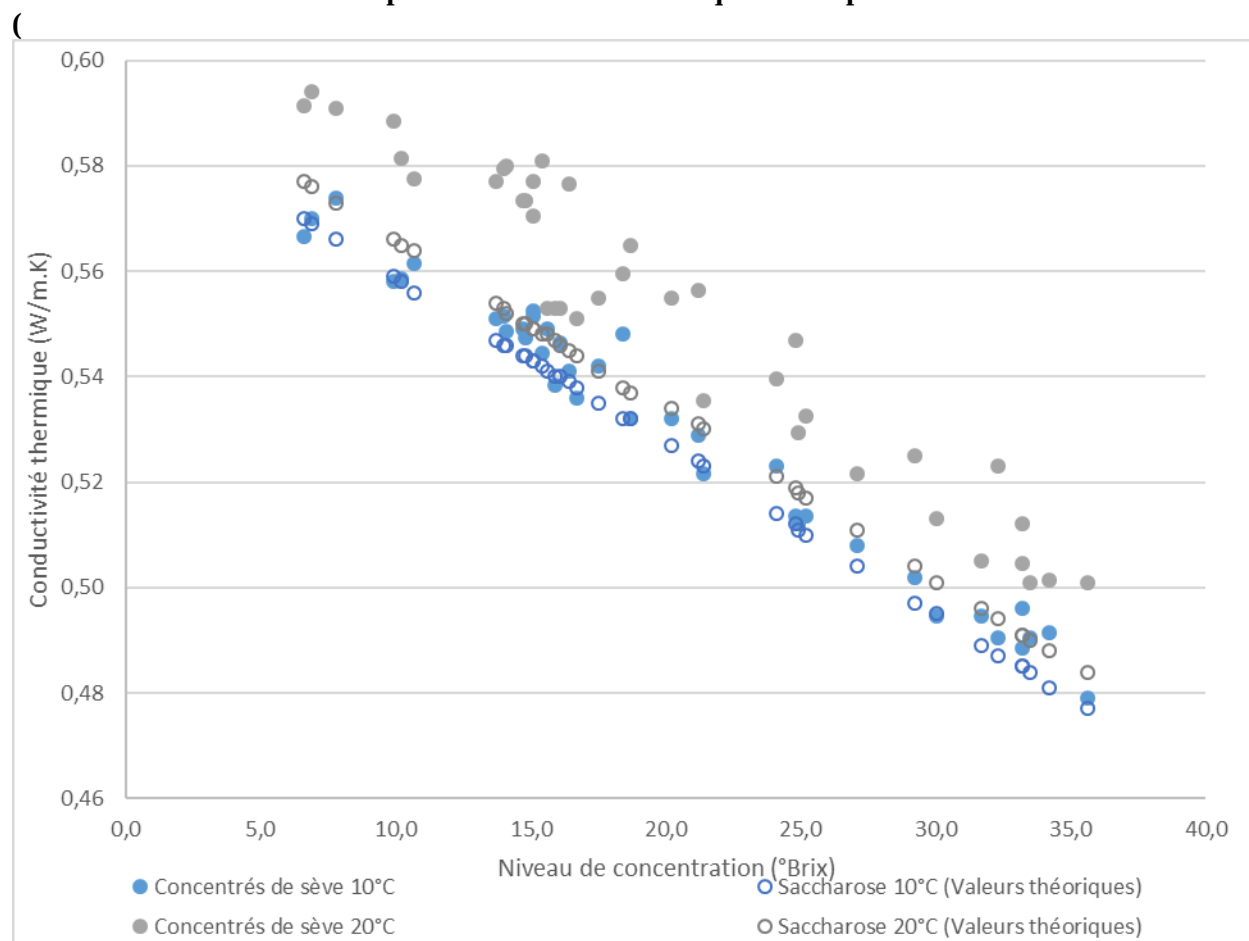


Figure 4). Cet écart est de $0,8 \% \pm 0,01$ (10°C) et de $3,43 \% \pm 0,01$ (20°C). Ce résultat est concordant avec la précision de la méthode décrite précédemment, où une température plus élevée présente des résultats plus éloignés de la réalité. Il semble donc que les résultats à 10°C sont plus fiables, et que la référence des solutions de saccharose demeure valide pour le concentré de sève d'érable.

Tableau 9 – Résultats moyens de conductivité thermique (W/m.K) à différents intervalles de concentration

Intervalle de concentration (°Brix)	Valeur expérimentale moyenne (W/m.K)
-------------------------------------	--------------------------------------

	10 °C	20 °C
6,6 à 10,7	0,565 ±0,0065	0,587 ±0,0064
13,7 à 20,2	0,545 ±0,0067	0,567 ±0,0115
21,2 à 27,1	0,517 ±0,0074	0,537 ±0,0116
29,2 à 35,6	0,492 ±0,0063	0,510 ±0,0093

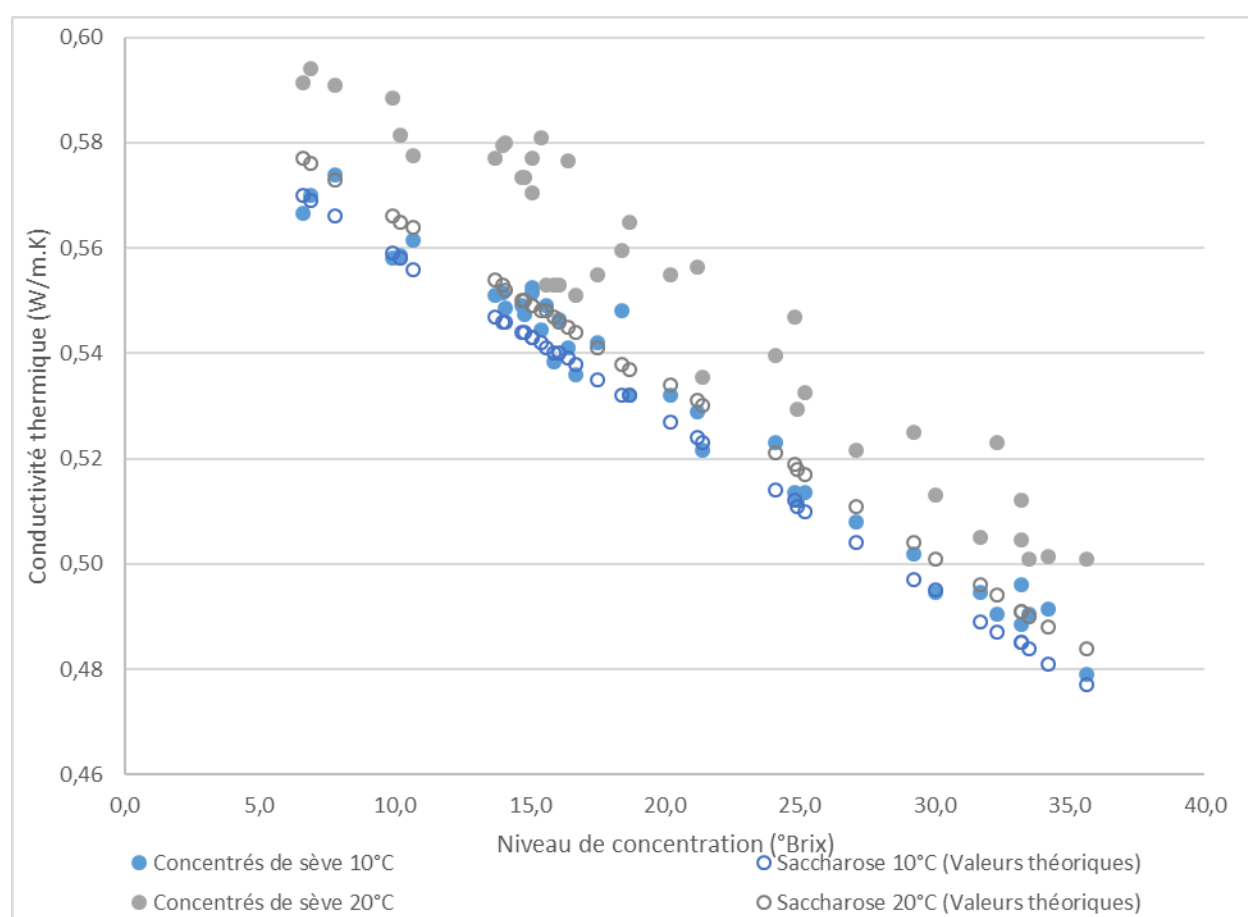


Figure 4 – Conductivités thermiques moyennes mesurées en laboratoire

Comme les données sont réparties de façon relativement proportionnée, il est possible d'utiliser la méthode de régression linéaire à deux facteurs pour établir une formule de conductivité

thermique intégrant les valeurs de °Brix et de température. La comparaison entre les données obtenues en laboratoire et les données calculées avec cette formule donne un écart moyen de $0,01 \% \pm 0,011$. L'écart est très faible, ce qui indique une très bonne correspondance entre les valeurs. De plus, le coefficient de détermination multiple de la formule est de 0,978, ce qui est aussi très précis. La formule obtenue est la suivante :

$$\text{Conductivité thermique (W/m.K)} = (2,07179487 \times 10^{-03} \times \text{Température (°C)}) - (3,23567015 \times 10^{-03} \times \text{°Brix}) + 0,575193854$$

La formule a été utilisée afin de dresser un tableau de référence (Tableau 10) pour les données à 10 et 20 °C entre 6 et 36 °Brix. Les valeurs théoriques pour le saccharose sont également indiquées dans ce tableau à titre comparatif.

Tableau 10 – Conductivité thermique (W/m.K) du concentré de sève selon la température et le niveau de concentration en comparaison avec la valeur théorique pour le saccharose

Conductivité thermique (W/m.K)		Concentré de sève		Saccharose ⁵	
		Température (°C)			
		10	20	10	20
Concentration (°Brix)	6	0,5765	0,5972	0,5720	0,5786
	8	0,5700	0,5907	0,5655	0,5721
	10	0,5636	0,5843	0,5591	0,5657
	12	0,5571	0,5778	0,5527	0,5593
	14	0,5506	0,5713	0,5463	0,5529
	16	0,5441	0,5649	0,5399	0,5465
	18	0,5377	0,5584	0,5335	0,5400
	20	0,5312	0,5519	0,5270	0,5336
	22	0,5247	0,5454	0,5206	0,5272
	24	0,5183	0,5390	0,5142	0,5208
	26	0,5118	0,5325	0,5078	0,5144
	28	0,5053	0,5260	0,5014	0,5080
	30	0,4988	0,5196	0,4950	0,5015
	32	0,4924	0,5131	0,4885	0,4951
	34	0,4859	0,5066	0,4821	0,4887
	36	0,4794	0,5001	0,4757	0,4823

⁵ Handbook of chemistry (2008) ; Mohos (2010)

Une recherche littéraire a permis de comparer les modèles obtenus avec des études antérieures dans des solutions sucrées. En fait, la conductivité thermique est un paramètre qui est très variable dû à la composition des aliments. De façon générale, ce paramètre est influencé par la composition complexe des fluides, dont le contenu liquide et le contenu solide (protéines, carbohydrates, fibres, minéraux, etc.). Il dépend également de la structure des composés (Muramatsy et al 2005). Plusieurs modèles ont été proposés par le passé pour le déterminer en fonction de la nature du composé. Une analyse de différents liquides alimentaires sucrés (solution de saccharose, solution de fructose, jus divers) a permis de constater que ce paramètre suit toujours une tendance similaire pour ce type de liquide. En effet, la conductivité thermique a tendance à diminuer avec le contenu en solides totaux (°Brix) et à augmenter avec la température. L'équation qui en est ressortie est la même pour tous ces fluides sucrés, avec pour différence le facteur à appliquer. Le modèle proposé est l'équation quadratique suivante (Muramatsy et al 2005):

$$\text{Conductivité thermique} = (a \times \text{°Brix}^2 \times \text{Température}) + (b \times \text{°Brix}^2) + (d \times \text{°Brix} \times \text{Température}) + (e \times \text{°Brix}) + (f \times \text{Température}) + g$$

Où, pour une solution de saccharose, les valeurs des paramètres sont :

Paramètre	a	b	d	e	f	g
Saccharose	-1.182×10^{-7}	-3.341×10^{-6}	-2.511×10^{-6}	-3.006×10^{-3}	1.36×10^{-3}	5.758×10^{-1}

Les valeurs obtenues de façon théorique pour le saccharose et de façon expérimentale pour les concentrés ont été vérifiées avec cette équation. Il est possible de constater que l'équation fonctionne très bien pour le saccharose, avec un écart moyen de $0,07\% \pm 0,0008$ (10°C) et de $1,04 \pm 0,0015$ (20°C). Pour le concentré de sève, avec les mêmes paramètres, on obtient un peu plus de variation, mais celle-ci est encore minimale avec un écart moyen de $0,86\% \pm 0,008$ (10°C) et de $2,29 \pm 0,014$ (20°C). Il serait intéressant de voir s'il était possible d'obtenir des paramètres spécifiques au concentré de sève qui fonctionneraient avec la même équation.

Toutefois, l'équation du saccharose semble une bonne alternative acceptable pour les calculs reliés au domaine acéricole.

De plus, d'autres sources ont permis d'établir que la conductivité thermique de solutions sucrées est un paramètre qui varie énormément avec la pression appliquée (Werner et al. 2007). En effet, l'application d'une pression augmente la conductivité thermique des composés. En acériculture, cet effet pourrait être visible dans les systèmes de concentration membranaire, où la pression est augmentée pour concentrer la sève. Les essais réalisés ici n'ont pas considéré de variation de pression, il faudrait se questionner à savoir si des connaissances approfondies à ce niveau seraient pertinentes pour le domaine acéricole.

CAPACITÉ THERMIQUE

Les essais préliminaires de capacité thermique n'ont pas permis d'obtenir des données concluantes et suffisamment fiables pour continuer les essais. En effet, après avoir consulté différentes sources, dont un webinaire en ligne du fabricant, cette technologie semble plus facilement adaptable pour mesurer des matériaux (Schumand 2020). Il semble également que la mesure de liquide (tel que de l'eau) via un DSC est influencée par l'évaporation de celui-ci, et ce même à des températures entre 10 et 40 °C (Mettler-Toledo (2012)). Des essais comparatifs sur de l'eau avec ce type d'équipement ont montré une dérivation entre les données expérimentales et théoriques entre 7,9 et 8,8%. Le concentré étant liquide, l'équipement disponible ne semble pas permettre l'utilisation de méthodes compensant l'évaporation et engendrerait des écarts expérimentaux comparativement à la réalité (Mettler-Toledo (2012)).

De plus, l'équipement disponible pour réaliser les mesures ne permettait pas d'obtenir directement la valeur de capacité thermique, mais plutôt une valeur de flux de chaleur qu'il aurait été nécessaire de traduire en capacité thermique. Le flux de chaleur donne des unités en W/s, et ne peut être traduit tel quel en capacité thermique (CP en J/g/°C). Le traitement des données aurait nécessité plus d'informations qui ne nous semblaient pas facilement accessibles avec cet équipement. De même, l'implantation d'une procédure applicable peut être difficile, puisqu'elle nécessite de trouver l'échantillon de référence adéquat pour le fluide analysé. Il est également complexe de déterminer la bonne valeur de taux de chauffage à appliquer, puisque celle-ci

engendre des variations dans la façon dont le produit réagit, surtout lorsque la solution ou le matériau atteint son pic de capacité thermique.

Les prétests réalisés ont permis d'obtenir des valeurs de Flux de chaleur pour l'eau et pour du concentré de sève à 35,6°Brix. Pour chaque fluide, 3 courbes (3 répétitions) ont été obtenues. Le fait que les résultats soient négatifs indique une réaction isothermique alors que des valeurs positives auraient signifié une réaction exothermique. Les moyennes ont été calculées en valeurs absolues et la formule de ratio a été appliquée pour calculer une capacité thermique = Flux de chaleur (Q en W/g) / taux de chauffage (°C/min) x 60.

Les données expérimentales obtenues à partir du DSC montrent que la première partie de la courbe formant un pic ne doit pas être considérée, car elle correspond à une réaction isothermique normale due au démarrage de l'équipement (Figure 5). Les courbes démontrent également que les 3 répétitions avec le concentré présentent une certaine variabilité. En effet, l'essai #1 avec l'échantillon de concentré est toujours environ 41% plus faible que les essais #2 et #3. Les essais #2 et #3 semblent relativement comparables l'un avec l'autre avec un écart d'environ 1,1%. Les essais avec l'eau démontrent des écarts variant entre -1,3 et 3,0%, ce qui semble déjà plus stable. Ceci exprime bien l'incertitude liée à la méthode appliquée.

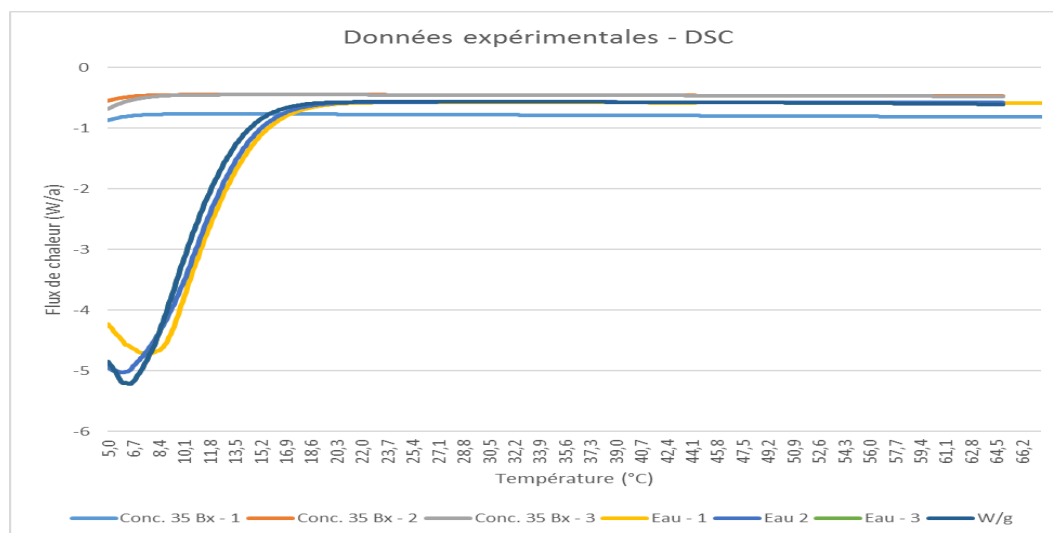


Figure 5 – Résultats du prétest réalisé au DSC

La capacité thermique calculée a été ramenée sous l'intervalle de température qui semblait moins affecté par les pics de chauffage de départ et de fin des essais (Figure 6). Quelques valeurs théoriques pour l'eau ont été comparées avec celles calculées de façon expérimentale pour une même température. Les résultats démontrent un grand écart autour de 20% (Tableau 11), signifiant que la méthode d'analyse et de calcul n'était pas à point sur cet appareil pour nous permettre de procéder à des essais subséquents.

Tableau 11 Comparaison des valeurs de capacité thermique (kJ/kg/°C) de référence et mesurées pour l'eau

Température (°C)	Valeur théorique Eau ⁶ (kJ/kg/°C)	Valeur expérimentale moyenne Eau (kJ/kg/°C)	Écart entre les mesures
20	4,182	5,08	21 %
40	4,179	4,91	17 %
60	4,185	5,00	19 %

Tableau 12 - Comparaison des valeurs de capacité thermique (kJ/kg/°C) de référence pour le saccharose et mesurées pour le concentré

Température (°C)	Valeur théorique Solution saccharose 90% pureté ⁷ (kJ/kg/°C)		Valeur expérimentale moyenne Concentré (kJ/kg/°C)	Écart entre les mesures	
	30 Brix	40 Brix	35,6 Brix	30 Brix	40 Brix
20	3,47	3,22	4,76	37 %	48 %
30	3,49	3,25	4,82	38 %	48 %
40	3,51	3,28	4,88	39 %	48 %
50	3,53	3,31	4,94	40 %	49 %

⁶ Handbook of chemistry (2008)

⁷ Asadi (2007)

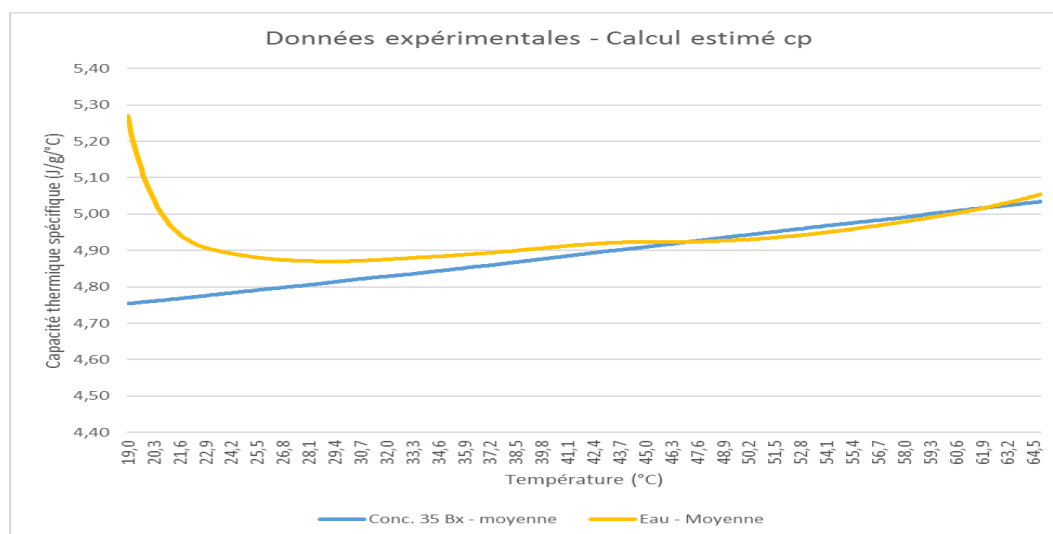


Figure 6 – Courbe de capacité thermique estimée à partir des données expérimentales

Les valeurs théoriques pour une solution de sucre pure à 90% et pour les valeurs calculées pour le concentré ont également été comparées. L'écart obtenu entre les mesures varie entre 37 et 49%, ce qui est beaucoup trop grand pour considérer les valeurs obtenues comme fiables. En fait, il est plutôt étrange de constater que les valeurs obtenues expérimentalement pour le concentré et pour l'eau soient très rapprochées l'une de l'autre pour une même température. Tous ces résultats indiquent que les essais n'étaient pas concluants, soit au niveau de l'instrument, du protocole ou encore de la méthode de calcul. Il a donc été décidé de ne pas poursuivre les essais avec cet instrument.

ACTIVITÉ DE L'EAU

L'activité de l'eau est une mesure qui permet d'évaluer la quantité d'eau disponible dans un produit pour permettre des réactions biologiques, telles que la croissance microbienne. Plus cette dernière est faible, plus les microorganismes ont de la difficulté à croître dans le produit. Elle est exprimée comme le ratio de pression de vapeur (kPa) de l'aliment sur la pression de vapeur (kPa) de l'eau pure, ce qui indique comment l'eau peut se déplacer de l'aliment vers les cellules microbiennes. Normalement, ce paramètre augmente avec la température. Chaque aliment présente un modèle distinct, qui varie en fonction de sa composition spécifique. On assume

généralement qu'un niveau d'activité de l'eau supérieur à 0,95 est élevé et permet la croissance microbienne. (Province of Manitoba, FDA 1984, Lewicki et al 2009).

Les valeurs de référence et mesurées pour l'eau et des solutions de saccharose (Tableau 13) sont très comparables entre elles, avec des écarts de moins de 0,5%. Cela signifie que la méthode de mesure est représentative de la réalité. Il est à noter que la précision de mesure l'instrument est de $\pm 0,003$ (Annexe 1).

Tableau 13 - Comparaison des valeurs d'activité de l'eau de référence et mesurées pour l'eau et des solutions de saccharose

Matrice		T (°C)	Valeur de référence ⁸ (Réf)	Valeur mesurée (Exp)	N	% écart Réf – Exp
Eau déionisée		24	1,000	$0,998 \pm 0,002$	12	0,2%
Solution de saccharose	10%	24	0,996	$0,993 \pm 0,002$	4	0,3%
	20%	24	0,989	$0,987 \pm 0,001$	6	0,2%
	40%	24	0,965	$0,960 \pm 0,004$	8	0,5%

Les résultats obtenus pour l'activité de l'eau en fonction du niveau de °Brix ont été regroupés au Tableau 14. Il est possible de constater que ceux-ci sont tous supérieurs à 0,95, et sont susceptibles de permettre la croissance bactérienne. On constate également que dans le cas du concentré de sève, l'activité de l'eau diminue avec le niveau de concentration. Il faut toutefois noter que ces valeurs sont valables pour du concentré obtenu à l'aide du concentrateur membranaire. En effet, il n'y a pas de données disponibles pour confirmer si un concentré de sève qui serait parvenu à ce niveau par le processus d'évaporation pourrait donner des résultats différents.

⁸ Food Safety Bulletin (03/97)

Tableau 14 – Résultats moyens de l'activité de l'eau à différents intervalles de concentration

Intervalle de concentration (°Brix)	Aw à 25 °C
6,6 à 10,7	0,994 ±0,0014
13,7 à 20,2	0,988 ±0,0011
21,2 à 27,1	0,981 ±0,0023
29,2 à 35,6	0,971 ±0,0033

La mesure de l'activité de l'eau est normalement réalisée à une température standardisée de 25 °C. Par conséquent, il n'est pas nécessaire de faire varier la température lors des essais expérimentaux, qui ont été réalisés à une température moyenne de $23,4 \pm 0,3$ °C

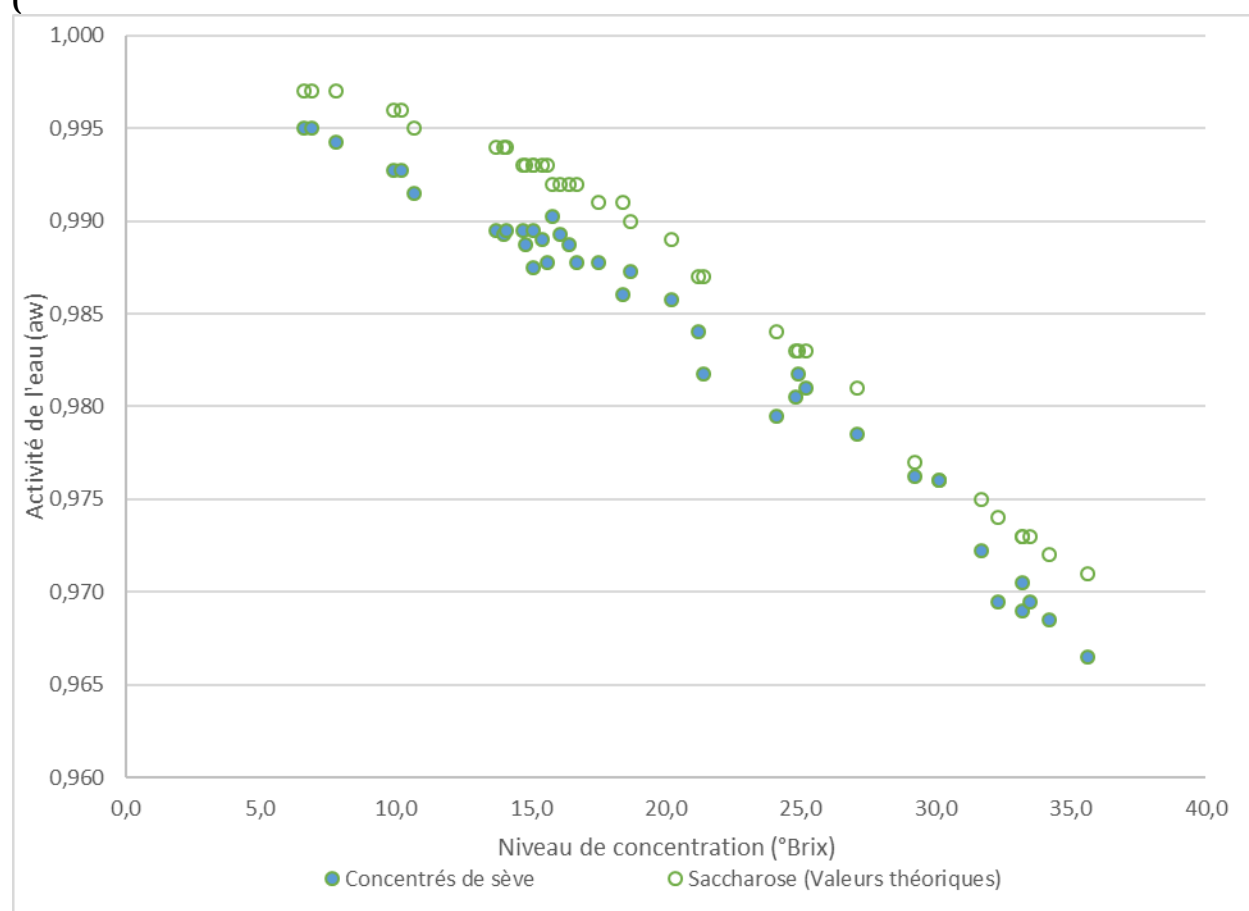


Figure 7). La comparaison avec une solution de saccharose a été tirée d'une moyenne de 4 sources différentes, dont les valeurs étaient très similaires (Corroler et al 2001, Food safety bulletin 03/97, Kumar et al 2012, Lewicki 2009). Les résultats obtenus démontrent une tendance à former une droite. D'ailleurs, plus le niveau de concentration augmente, plus l'activité de l'eau est faible. Bien que les valeurs obtenues soient inférieures pour le concentré de sève comparativement au saccharose, la différence entre les deux est très faible, soit de l'ordre de 0,34 % $\pm$ 0,0013. Cet écart est similaire à celui obtenu pour la méthode avec l'eau et le saccharose, indiquant que cela pourrait être relié à la variabilité de la méthode plutôt qu'à une différence majeure entre le concentré et le saccharose. Les valeurs pour le saccharose semblent donc pouvoir être utilisées également pour le concentré.

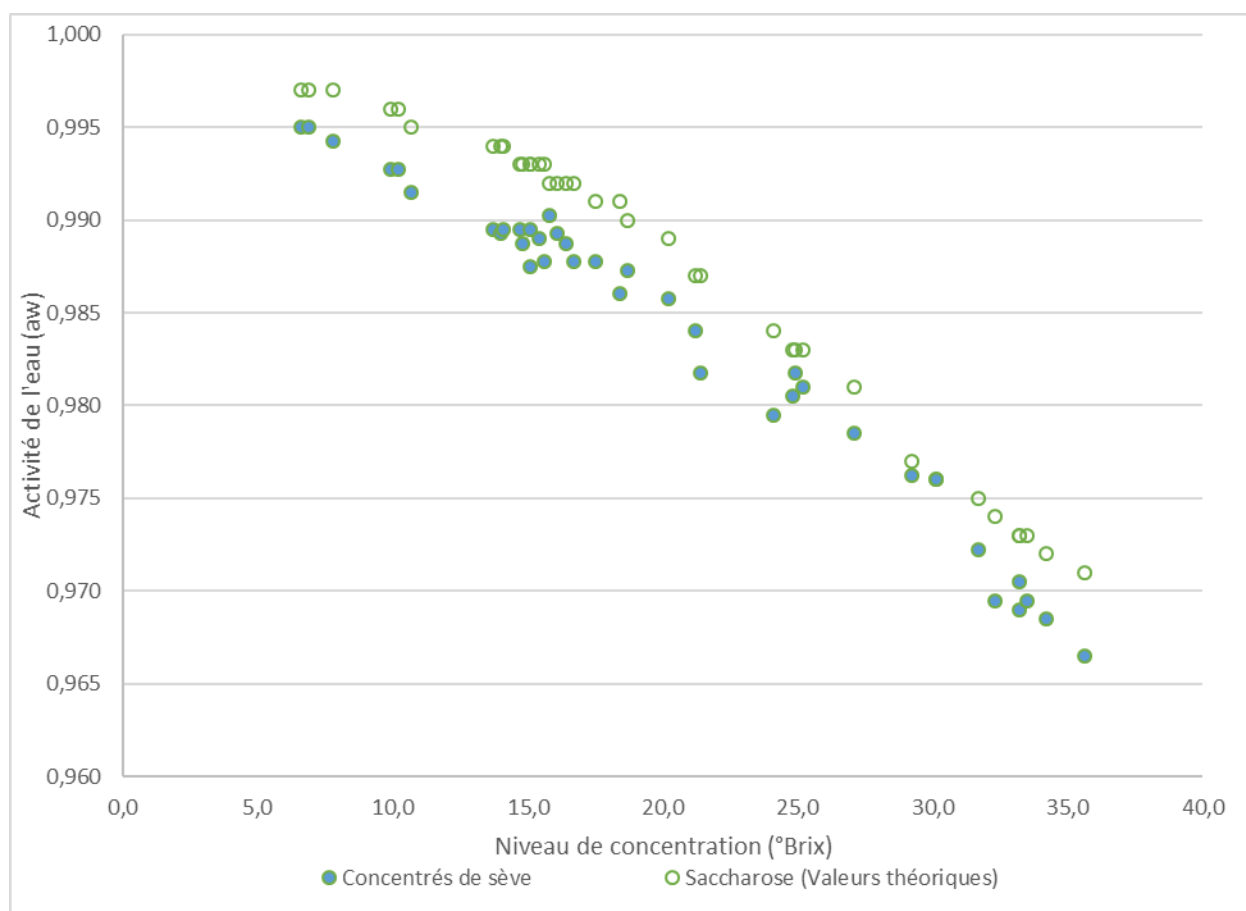


Figure 7 – Activités de l'eau moyennes mesurées en laboratoire

Les données du concentré formant quasiment une droite descendante, une régression linéaire a pu être réalisée pour obtenir une équation avec un coefficient de détermination R^2 de 0,97, ce qui est acceptable. L'équation est de la forme suivante :

$$\text{Activité de l'eau (aw)} = (-0,001 \times \text{°Brix}) + 1,0034$$

Les données calculées à partir de cette équation comparativement aux données expérimentales sont très près, avec un écart de seulement 0,06 % $\pm$ 0,15. Ce résultat suggère que l'équation déterminée est valable pour l'intervalle de concentration testé. Les données pour différents niveaux de °Brix ont donc été compilées au Tableau 15.

Tableau 15 – Activité de l'eau du concentré de sève selon la température et le niveau de concentration en comparaison avec la valeur théorique pour le sucre

Activité de l'eau		Concentré de sève	Saccharose ⁹
		Température (°C)	
		23	
Concentration (°Brix)	6	0,997	0,998
	8	0,995	0,997
	10	0,993	0,996
	12	0,991	0,997
	14	0,989	0,995
	16	0,987	0,992
	18	0,985	0,990
	20	0,983	0,988
	22	0,981	0,986
	24	0,979	0,984
	26	0,977	0,981
	28	0,975	0,979
	30	0,973	0,977
	32	0,971	0,975
	34	0,969	0,973
	36	0,967	0,970

CONCLUSION

La densité, la viscosité, la conductivité thermique et l'activité de l'eau ont été analysées sur un lot de concentrés de sève de concentrations variées et provenant de différentes saisons et régions

⁹ Food Safety Bulletin (03/97)

du Québec. La mesure de pression osmotique ainsi que la mesure de la capacité thermique n'ont pas pu être réalisées comme prévu initialement, car il a été impossible de trouver un équipement de mesure adéquat.

Pour chacun de ces paramètres, les analyses réalisées ont permis de déterminer que les tables et équations de référence existantes pour les solutions de saccharose sont adaptées pour l'estimation du comportement du concentré de sève d'érable. En plus de ce constat, il a été possible, dans la majorité des cas, de développer des équations spécifiques au concentré de sève d'érable de façon à estimer les valeurs correspondantes. Ces estimations doivent demeurer dans l'intervalle de concentration et de température analysé pour chaque paramètre (de 6 à 36 °Brix; de 10 à 20 °C). La mesure de viscosité n'a pas permis d'obtenir un modèle s'adaptant parfaitement aux données obtenues, étant donné la faible précision de l'appareil utilisé en dessous de 3 CP. Pour ce paramètre, il semble plus adapté de continuer à utiliser les tables de saccharose jusqu'à avis contraire.

Puisque la sève et les concentrés de sève sont des fluides qui varient énormément en fonction de la nature de l'érablière et des saisons de récolte, un échantillonnage plus vaste pourrait permettre d'affiner et de confirmer les modèles obtenus, en incorporant une plus grande diversité de concentrés.

Les données obtenues ont permis dans ce projet de caractériser la matière première pour améliorer la connaissance et faciliter les calculs inhérents aux équipements de transformation acéricoles. Les connaissances de la matière première sont importantes, mais celles du produit fini le sont tout autant dans la détermination de certains paramètres de procédés. Il serait alors intéressant de compléter ces essais avec un échantillonnage et une analyse de réduits et de sirops d'érable afin de parfaire nos connaissances sur ces produits qui se distinguent des autres fluides alimentaires.

REMERCIEMENTS

Nous aimerions remercier la table sectorielle acéricole du MAPAQ pour leur soutien dans ce projet. Des remerciements s'imposent également au Centre de recherche et de développement de Saint-Hyacinthe pour le prêt des équipements utilisés pour les mesures des différents paramètres.

BIBLIOGRAPHIE

Allard, G. (1999), Calcul du poids spécifique relatif (densité) d'une solution de sucre d'érable en fonction de sa concentration (°Brix), Centre ACER, Québec, 3 p.

Asadi, M. (2007), Beet-Sugar Handbook, Wiley-interscience, A John Wiley & sons inc. Publication, <https://tripleis.org/wp-content/uploads/2019/12/beet-sugar-handbook.pdf>

Barker, B. (1998), Theoretical and practical considerations on the rheology of sugar products. Sugar Milling Research Institute, University of Natal, Durban. 300-305

CEDUS, Les propriétés physiques et chimiques du saccharose, CEDUS en collaboration avec l'Université de Reims, <https://studylibfr.com/doc/10061683/381523519-proprietes-saccharose>

Çengel, Y. A., 2007, Heat and Mass Transfer: A Practical Approach. 3rd edition. McGrawHill, New York.

Coroller, L., Leguerinel, I., Mafart, P. (2001), Effect of Water Activities of Heating and Recovery Media on Apparent Heat Resistance of *Bacillus cereus* Spores. Applied and Environmental Microbiologie, 67 (1) : 317-22.
https://www.researchgate.net/publication/12196410_Effect_of_Water_Activities_of_Heating_and_Recovery_Media_on_Apparent_Heat_Resistance_of_Bacillus_cereus_Spores

Darros-Barbosa, R., Balaban, M.O., Teixeira, A.A. (2003), Temperature and Concentration Dependence of Heat Capacity of Model Aqueous Solutions, International Journal of Food Properties, 6 :2, 239-258. DOI : 10.1081/JFP-120017845

Darros-Barbosa, R., Balaban, M.O., Teixeira, A.A. (2007), Temperature and Concentration Dependence of Density of Model Liquid Foods. International Journal of Food Properties. Vol. 6, No 0. P. 1-20é

Daw, J. E (2008), Measurement of Specific Heat Capacity Using Differential Scanning Calorimeter. Idaho National Laboratory, Idaho Falls, INL/EXT-08-15056

Engineering ToolBox, (2014). Sugar Water Solutions – Viscosities.

https://www.engineeringtoolbox.com/sugar-solutions-dynamic-viscosity-d_1895.html

Engineering ToolBox, (2017). Density of aqueous solutions of organic substances as sugars and alcohols. https://www.engineeringtoolbox.com/density-aqueous-solution-organic-sugar-alcohol-concentration-d_1954.html

FDA (1984), Water Activité (aw) in Foods, Dept. Of health, education, and welfare public health service food and drug administration, <https://www.fda.gov/inspections-compliance-enforcement-and-criminal-investigations/inspection-technical-guides/water-activity-aw-foods>

Food Safety Bulletin (03/97), Water Activity of Sucrose and NaCl Solutions, Food safety bulletin, BC center for disease control, <https://ucfoodsafety.ucdavis.edu/sites/g/files/dgvnsk7366/files/inline-files/133655.pdf>

Handbook of chemistry and physics 88th edition, CRC Handbook of Chemistry and Physics, 88th Ed.; Lide, D.R., Ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, 2008; Section 8, p 74.

ISCOTABLES, 7th ed. Viscosities, densities of urea, guanidine hydrochloride solutions; Table - sucrose solutions, composition, viscosity, density @20oC <http://lclane.net/text/sucrose.html>

Kumar, S., Kumar, R. (2012) Activity coefficients of aqueous solutions of aceto-hydroxamic acid solutions at 298.15 K and 0.1 MPa, Journal of Molecular Liquids 172 : 140-143.

Lewicki, P. P. (2009), Data and Models of Water Activity. I : Solutions and Liquid Foods Food, Properties Handbook CRC Press.

Messaâdi, A et al. (2015), A New Equation Relating the Viscosity Arrhenius Temperature and the Activation Energy for Some Newtonian Classical Solvents, Journal of Chemistry, vol 2015, Article 163262, 12p.

Mettler-Toledo (2012), STAR Software Webinar Specific Heat Capacity determination by DSC, Webinar, https://www.mt.com/ca/en/home/products/Laboratory_Analytics_Browse/TA_Family_Browse/TA_software_browse/STARe_Software_Option_Specific_Heat_1.html?cmp=sea_06010105&SE=

[GOOGLE&Campaign=MT_ANA-TA_EN_CA&Adgroup=DSC_Specific-Heat_Measurement&bookedkeyword=dsc%20specific%20heat&matchtype=p&adtext=404068722868&placement=&network=g&clid=k_EAIaIQobChMIvqTz8LLa9gIVw8qGCh3AfQIEAAYASAAEgKPjFD_BwE_k_&cq_src=google_ads&cq_cmp=258547400&cq_con=19272390080&cq_term=dsc%20specific%20heat&cq_med=&cq_plac=&cq_net=g&cq_pos=&cq_plt=gp&clid=EAIaIQobChMIvqTz8LLa9gIVw8qGCh3AfQIEAAYASAAEgKPjFD_BwE](https://www.google.com/campaign=MT_ANA-TA_EN_CA&Adgroup=DSC_Specific-Heat_Measurement&bookedkeyword=dsc%20specific%20heat&matchtype=p&adtext=404068722868&placement=&network=g&clid=k_EAIaIQobChMIvqTz8LLa9gIVw8qGCh3AfQIEAAYASAAEgKPjFD_BwE_k_&cq_src=google_ads&cq_cmp=258547400&cq_con=19272390080&cq_term=dsc%20specific%20heat&cq_med=&cq_plac=&cq_net=g&cq_pos=&cq_plt=gp&clid=EAIaIQobChMIvqTz8LLa9gIVw8qGCh3AfQIEAAYASAAEgKPjFD_BwE)

Mohos, F. A. (2010), Confectionery and Chocolate Engineering : Principles and Applications, Wiley-Blackwell, United Kingdom.

Muramatsy, Y., Tagawa, A., Kasai, T. (2005), Thermal Conductivity of Several Liquid Foods, Food Sci. Technol. Res., 11 (3), 288-294

O'Neill, M.H. (1966), Measurements of Specific Heat Functions by Differential Scanning Calorimetry. The Perkin-Elmer Corp., Norwalk, Conn. vol. 36, no 10.

Province of Manitoba, Water Content and Water Activity : Two Factors That Affect Food Safety, Province of Manitoba – Agriculture, <https://www.gov.mb.ca/agriculture/food-safety/at-the-food-processor/water-content-water-activity.html>

Schumann, Y (2020). Specific Heat Capacity Measurements Using DSC and Modulated DSC, TA Instrument, Webinar, <https://www.tainstruments.com/specific-heat-capacity-measurements-using-dsc-and-modulated-dsc/>

V.R.N. Telis, J. Telis-Romero, H.B. Mazzotti & A.L. Gabas (2007) Viscosity of Aqueous Carbohydrate Solutions at Different Temperatures and Concentrations, International Journal of Food Properties, 10:1, 185-195, DOI: 10.1080/10942910600673636

Werner, M., Baars, A., Werner, F., Eder, C., Delgado, A. (2007) Thermal Conductivity of Aqueous Sugar Solutions under High Pressure, Int. J. Thermophys 28; 1161-1180

Zurith, et al. (2005), Density, viscosity and coefficient of thermal expansion of clear grape juice at different soluble solid concentrations and temperatures, Journal of Food Engineering, vol. 71, 143-149.

ANNEXE

Tableau 16 – Spécification des instruments de mesure utilisés

Mesure	Instrument	Précision	Intervalle de mesure
Densité	DensitoPro, Mettler-Toledo GmbH, Suisse	$\pm 0,001 \text{ g/cm}^3$	0 à 3 000 g/cm^3
Viscosité	DV2TLV Brookfield Engineering Laboratories, inc. USA	$\pm 1\%$	3 à 10 000 cp (Broche #18)
Conductivité thermique	KD2 Pro muni de la sonde KS-1 Decagon Devices inc., USA	$\pm 5\%$ de 0,2 à 2 W/mK $\pm 0,01 \text{ W/K}$ de 0,02 à 0,2 W/mK	0,02 à 200 W/mK
Capacité thermique	DSC Discovery Q200 TA Instruments	Non Défini	Non Défini
Activité de l'eau	AquaLab, CX-2 Decagon Devices inc., USA	$\pm 0,003$	Non Défini