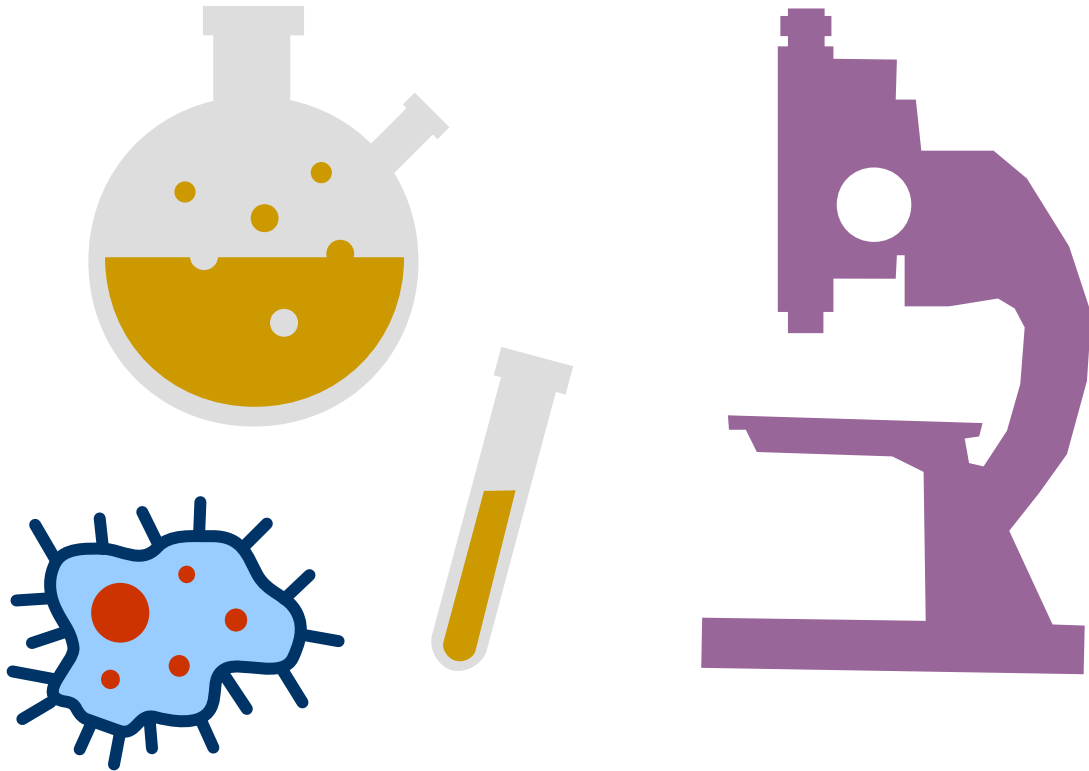


« Sciences » du brassage amateur

Ou le brassage amateur vu sous l'angle de la connaissance.



Auteur : [Pierre-Alain Dorange](#) / 2020-2025 / Version : 0.9.1 / juillet 2025

Licence (textes et illustrations) : libre, [Creative Commons by-sa 4.0](#)



Les dernières versions à jour et les originaux sont disponibles ici : [Pico-brasserie du Temple](#)

Sources principales d'informations

- Site internet (anglais) : [“BrewWiki”](#), [“Braukaiser wiki”](#), « [Oxford Companion to Beer \(dictionnaire\)](#) »
- Site internet [“Univers Bière”](#), Le Nain Brasseur
- Livre « [How to Brew](#) » de John Palmer (4e édition, 2017)
- Forum francophone et wiki [“Brassage Amateur”](#)
- Site encyclopédique “Wikipédia”, [version internationale](#) / [version française](#)

Table des matières

1. Introduction.....	4
1.1. Organisation du recueil.....	4
1.2. Notes.....	4
1.3. Contact.....	4
2. Généralités.....	5
2.1. Aliments fermentés : bière, pain, hydromel et vins.....	7
3. Culture et récolte des céréales.....	8
3.1. Orge.....	8
3.2. Variétés d'orge.....	8
3.3. Culture de l'orge.....	9
4. Céréales et Maltage.....	10
4.1. Germination et maltage.....	10
4.2. Processus chimique de cuisson.....	13
5. Concassage des céréales.....	16
5.1. Moulin.....	16
5.2. Finesse du concassage.....	16
5.3. Humidification du grain (malt conditioning).....	16
6. Empâtage.....	17
6.1. Principes généraux.....	17
6.2. Préparation de l'eau pour l'empâtage.....	19
6.3. Ajustements de l'eau de brassage.....	20
6.4. Conduire l'empâtage.....	25
7. Filtrage et rinçage.....	29
8. Cuisson.....	30
8.1. Aromatisation du moût.....	30
8.2. Cassure à chaud (Hot Break).....	32
9. Refroidissement.....	33
9.1. Méthodes de refroidissement.....	33
9.2. Cassure à froid (cold break).....	34
9.3. Tourbillonner (whirlpool).....	34
10. Fermentation.....	36
10.1. Famille de levure.....	36
10.2. Biochimie des levures.....	36
10.3. Processus biochimique principal.....	37
11. Mise en bouteille.....	40
11.1. Siphon (ou larron).....	40
12. Mûrissement.....	41
12.1. Re-fermentation en bouteille.....	41
12.2. Vieillessement.....	44
13. Dans le verre.....	46
13.1. Pétillance et mousse.....	46
14. Dégustation (sensations).....	48
14.1. Vision.....	49
14.2. Flaveurs (goût & arômes) : saveurs, arômes et sensations trigéminales.....	52
14.3. Chimie des flaveurs.....	52
14.4. Toucher.....	57
14.5. Oûie.....	58
15. Styles de bière.....	59
15.1. Éléments du classement.....	59
15.2. Quelques « grands » styles.....	60
15.3. Autres classements.....	60
16. Histoires de la bière.....	62
16.1. Histoire de la bière et du brassage.....	62
16.2. Pratiques de brassage.....	66
16.3. Petite histoire des céréales.....	68
16.4. Petite histoire des aromates.....	69
16.5. Petite histoire des levures.....	69

16.6. Les grandes étapes technologiques.....	72
17. Introduction à la Thermodynamique.....	74
17.1. Notions de thermodynamique.....	74
17.2. Brassage et thermodynamique.....	75
17.3. Principales caractéristiques thermiques des matériaux.....	78
17.4. Thermodynamique des liquides.....	80
17.5. Thermodynamique des gaz.....	80
17.6. Pression de vapeur saturante (évaporation-condensation).....	83
17.7. Chauffe.....	85
17.8. Refroidissement.....	86
17.9. Ébullition.....	87
17.10. Évaporation et dissolution/condensation.....	87
17.11. Dilatation.....	91
17.12. Propriétés des gaz et gaz parfaits.....	93
18. Introduction à la chimie.....	97
18.1. Structure de la matière.....	97
18.2. Tableau périodique des éléments chimiques.....	102
18.3. États de la matière.....	104
18.4. Chimie organique.....	106
18.5. Réaction chimique.....	106
18.6. Quelques réactions chimiques.....	108
18.7. Groupes fonctionnels.....	110
18.8. Acide et base.....	114
19. Introduction à la chimie de l'eau.....	116
19.1. Propriétés de l'eau pure.....	116
19.2. Eau pour le brassage.....	117
19.3. Usage de l'eau pendant le brassage.....	118
19.4. Paramètres de l'eau de brassage (profil).....	118
19.5. Équilibre d'acidité (alcalinité, dureté et pouvoir tampon).....	125
20. Introduction à la biochimie des céréales.....	128
20.1. Anatomie d'un grain de céréale.....	128
20.2. Céréales de brassage.....	130
20.3. Glucides.....	138
21. Introduction à la biochimie des protéines.....	143
21.1. Fonctions dans le vivant.....	143
21.2. Niveaux d'organisation.....	143
21.3. Acides aminés.....	144
21.4. Protéines lors du brassage.....	144
22. Introduction à la biochimie des enzymes.....	145
22.2. Principaux enzymes du brassage.....	146
22.3. Enzymes du malt.....	148
22.4. Enzyme des levures.....	151
23. Introduction à la biologie et biochimie des levures.....	154
23.2. Le monde du vivant et les classifications biologique.....	154
23.3. Taxonomie du vivant.....	155
23.4. Levures.....	155
23.5. Structure.....	156
23.6. Métabolisme.....	156
23.7. Levures de fermentation utilisées par l'homme.....	159
23.8. Bactéries.....	165
24. Annexes.....	167
24.1. Mesures et unités de mesure.....	168
24.2. Gérer les volumes.....	190
24.3. Propriétés physico-chimiques.....	193
24.4. Constantes.....	194
24.5. Index des figures et tableaux.....	195

1. Introduction

Ce recueil de notes vient en complément du document « *Brassage amateur, notes tout-grains* », c'est une vision complémentaire, plus détaillée et plus technique des processus mis en œuvre dans le brassage amateur traditionnel de la bière ; et qui met largement en avant les aspects technologiques et scientifiques. Cela peut permettre de mieux comprendre ce que l'on fait en brassant. Et moi ça me permet de réunir deux de mes passions : le brassage et la connaissance scientifique.

Attention toutefois, ce document est rédigé par un non-scientifique (j'ai une formation scientifique de base seulement et assez lointaine désormais) et correspond aux connaissances accumulées par l'étude et la lecture de diverses sources, ainsi que par ma pratique personnelle du brassage amateur. J'ai bien conscience que ce document est probablement un peu « prétentieux ».

L'étude des procédés de brassage met en œuvre plusieurs branches des sciences : chimie, biochimie et thermodynamique essentiellement, mais aussi géométrie, mécanique et optique.

1.1. Organisation du recueil

Le présent recueil est découpé en plusieurs parties principales :

- Les premiers chapitres (2 à 14) détaillent les **étapes de brassage** et aborde les notions techniques liés et renvoi aux chapitres scientifiques de la seconde partie ;
- les chapitres 13 à 15 se focalisent sur la **dégustation et le classement des bières**
- Le chapitre 16 est le premier chapitre réellement « scientifique » et fait un bref **historique** de la bière et du brassage, à partir des connaissances scientifiques actuelles.
- Les chapitres suivants, intitulés « Introduction à... » se focalise sur des **notions de science**, précisent et introduisent des concepts, vocabulaires et notions propre a ce domaine.
- Les annexes détaillent certains éléments, notamment la première (et plus grosse) annexe sur les unités de mesure, éléments essentiels en science.

1.2. Notes

Usage des liens :

- Les liens directement cliquables sur du texte sont des références internes, renvoyant à d'autres chapitres de ce document,
 - exemple : [Anatomie d'un grain de céréales](#)
- Les liens externes sont indiqués par le nom de la source cliquable, exemple :
 - Bière ([wikipédia](#))

1.3. Contact

Si vous constatez des erreurs, maladresses, souhaitez apporter des précisions ou proposer des compléments, vous pouvez joindre l'auteur par messagerie électronique : [Pierre-Alain Dorange](#)

2. Généralités

La fabrication de la bière consiste en plusieurs étapes et processus successifs pour aboutir au produit final. Ces processus sont essentiellement des process biochimiques et chimiques, accompagné de processus thermodynamique et mécaniques.

De manière générale, le brassage consiste à produire une « boisson alcoolisée, pétillante et aromatisée à partir d'un mélange de substances végétales amylacées (source d'amidon) ». Les enzymes du malt transformeront, partiellement, les glucides de l'amidon en sucres simples et les protéines en acides aminées qui serviront, ensuite, aux levures pour produire de l'éthanol et du dioxyde de carbone en produisant elles-mêmes leurs propres enzymes pour les assister.

Le brasseur lui doit préparer les ingrédients et fournir les conditions permettant toutes ces réactions biochimiques. Pour cela le brassage fait appel a plusieurs procédés successifs. Ce peut être vu comme de la cuisine.

Tableau 1 : Phases du brassage

Phases	Type de processus			Description
	Mécanique	Thermodynamique	Biochimique	
Culture et récolte des céréales				Multiplication et développement des céréales
Maltage des céréales				Germination et production de réserves d'amidons dans les grains de céréales et optionnellement cuisson des grains à secs ou en ambiance humide.
Concassage des céréales				Rendre accessible l'amidon en broyant les grains et produire un filtre naturel avec les écorces brisées.
Empâtage				Convertir l'amidon en sucres simples avec l'aide des enzymes naturellement présentent dans les grains.
Filtration				Éliminer les déchets (résidus de céréales ou drêche) pour ne conserver que le moût (liquide)
Cuisson				Stériliser, aromatiser et concentrer le moût ; accompagné de réaction de Maillard et de coagulation des protéines.
Refroidissement				Refroidir le moût et clarifier
Fermentation				Transformer les sucres simples en alcool et gaz
Mûrissement				Protéger pour conserver la bière (embouteillage et vieillissement)
Dégustation				

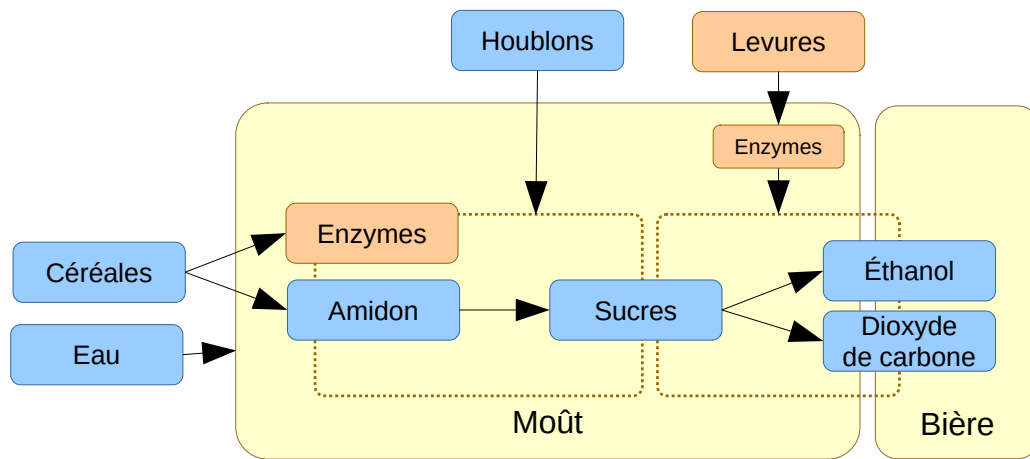


Figure 1 : Schématisation du brassage selon les ingrédients et composants

2.1. Aliments fermentés : bière, pain, hydromel et vins

Beaucoup d'aliments fermentés ont des points communs, voir des origines communes. Il en va pour la bière, le pain, le vin et l'hydromel qui tous se basent sur la fermentation alcoolique via une même famille de levures. Il existe d'autres fermentations à usage alimentaire (lactique essentiellement).

La bière se distingue principalement du vin et de l'hydromel par la source de sucres simples (jus de fruit pour le vin, miel pour l'hydromel et amidon des céréales pour la bière).

Le procédé de fermentation alcoolique est similaire (toutefois réalisé en milieu clos pour la bière afin de conserver de dioxyde de carbone dans la boisson). Historiquement il existe probablement des sources communes aux 3 boissons, voir le chapitre Histoires de la bière.

De même le pain et la bière ont des origines et procédés communs. Ils partagent la même levure. Pour le pain l'alcool s'évapore durant la cuisson et la production de dioxyde de carbone permet d'aérer et faire gonfler la pâte.

Ces 4 aliments fermentés partagent des levures similaires, toutefois il existe des souches très variées de cette famille de levures, adapté à chacun des aliments et même à différentes préparations d'un même aliment, voir chapitre Levures de fermentation utilisées par l'homme.

Tableau 2 : Comparaison des aliments fermentés

	Bière	Pain	Hydromel	Vin
Source de sucre	Céréales principalement		Miel	Raisin
Extraction des sucres	Maltage puis empâtage	Broyage fin (farine)	Aucune	Pressage
Aromatisation	Houblon principalement	Aucune	Possible	Aucune
Ferment	Levure <i>Saccharomyces cerevisiae</i> (principalement)			
Fermentation	Après cuisson, en milieu clos	Avant cuisson, en milieu ouvert	En milieu ouvert	

3. Culture et récolte des céréales

3.1. Orge

Référence : [Wikipédia](#)

L'orge est la céréale de base pour la fabrication de la bière. Pour plusieurs raisons techniques et historique : l'orge est une céréale qui contient un bon équilibre de base entre les réserves d'amidon, les enzymes et les protéines. Cette céréale comporte une enveloppe moyennement solide permettant de résister au broyage tout en permettant une bonne filtration du moût. L'orge est une plante rustique qui supporte des climats variés et ne nécessite pas de trop d'eau.

Elle est aussi utilisée pour la bière, notamment, car on réserve le blé tendre ou le seigle à la panification et l'alimentation humaine.

Certaines recettes mettent en œuvre d'autres céréales mais l'orge reste largement majoritaire.

En savoir plus sur les céréales, voir le chapitre Introduction à la biochimie des céréales.

L'orge commune a des usages en alimentation animale, en malterie et en alimentation humaine.

3.2. Variétés d'orge

L'orge est une céréale à paille courte. Il existe plusieurs variétés d'orge. On distingue notamment l'orge de printemps et l'orge d'hiver ; mais aussi l'orge à 6 rangs et l'orge à 2 rangs.

Au niveau agricole on distingue aussi l'orge fourragère et l'orge brassicole, qui est d'une qualité supérieure. Les malteurs ont des exigences en matière de friabilité, taux d'enzymes ou de protéines spécifiques.

3.2.a. Orge d'hiver (H)

L'orge d'hiver a besoin d'une période froide pour ensuite germer, on parle de vernalisation. Semé en automne et récolté au printemps. Résistant jusqu'à -15°C .

3.2.b. Orge de printemps (P)

Semé au printemps et récoltés mi-juillet. Résistant jusqu'à -7°C .

3.2.c. Orge à deux rangs (2R)

L'orge à 2 rangs (paumelle) a un rendement moins bon, et possède un pouvoir diastique inférieur et contient moins de protéines. Il est donc favorable pour les bières limpides. Très utilisés en brasserie artisanale, souvent considérés comme plus « noble » (traditionnel).

Il a une meilleure tenue à la verse (les tiges résistent mieux aux vents et à la pluie).

3.2.d. Orge à six rangs (6R)

L'orge à 6 rangs (escourgeons) a un pouvoir diastique supérieur, il permet d'y adjoindre plus de céréales crues ou grillées pour fabriquer la bière. Souvent considéré comme moins qualitatif et d'un rendement supérieur.

3.2.e. Qualité

Généralement le brasseur classe les orges du plus qualitatif au moins qualitatif : 2R+P, 2R+H puis 6R+H.

Le 2R+P est le plus courant de nos jours, notamment pour le brasseur amateur.

L'orge à 2 rangs est souvent considéré comme plus noble pour le brassage, mais les différences entre les 2 types sont devenues très faibles.

Orge	enveloppe	amidon	protéines	enzymes	corps	DMS
2 rangs		+		-	+	
6 rangs	+		+	+		+

3.3. Culture de l'orge

L'orge est une plante annuelle herbacée, plutôt rustique et robuste, ce qui la rend très tolérante à différents climats et peut se cultiver un peu partout. L'orge est la troisième céréale cultivée en France (2020) avec une production concentrée dans le quart Nord-Est. Avec une surface de 1,24 millions d'hectares, la France sa classe comme le second producteur mondial.

En France 36 % de l'orge produit est a destination brassicole.

La production mondiale est d'environ 144 millions de tonnes (FAO, 2004).

Le cycle de vie des céréales à paille se déroule sur 3 grandes phases :

- Période végétative
 - Semis – levée : les précurseurs des feuilles et racines sortent du grain, début de développement des premières feuilles ;
 - Tallage : le développement des feuilles progresse et est alors sensible à la température, les premières talles apparaissent ;
- Période reproductrice
 - Montée : le processus de ramifications débute ;
 - Montaison : la gaine foliaire de la dernière feuille gonfle et s'allonge, puis s'ouvre. Les premières barbes sont visibles ;
- Période de maturation
 - Multiplications cellulaires : les cellules des grains se multiplient afin de pouvoir se remplir ;
 - Enrichissement : les cellules se remplissent et gonflent, afin de donner à l'épi sa taille définitive. Les graines s'enrichissent afin de pouvoir se reproduire ;
 - Dessiccation : l'épi sèche, l'eau s'échappe pour durcir les grains.

C'est à la fin de dessiccation que l'orge se récolte. En cas de non récolte, l'orge entre en sénescence complète, pour allouer toutes les ressources aux épis qui permettront la reproduction de la culture.

4. Céréales et Maltage

Référence : [Univers Bière](#) et [Wikipédia](#)

Le malt est la matière première du brassage.

Le malt est une céréale maltée ; le maltage consiste à initier le processus de germination de la graine puis le stopper rapidement. C'est un processus essentiellement hydrique et thermique qui engendre des processus biochimiques et biologiques. Ce procédé entraîne la germination des graines, permet la production des enzymes, qui commencent la transformation des réserves d'énergie (sous forme d'amidon) en sucres.



Figure 2 : Différents malts

Le maltage consiste donc à préparer les céréales pour réaliser l'étape suivante d'empâtage. C'est un ensemble de réactions chimiques et biochimiques très complexes qui sont à l'œuvre.

Pour le brassage la céréale de base reste souvent l'orge, même si certaines recettes ajoutent des malts de froment ou d'autres céréales maltées ou non maltées.

Le brasseur amateur ne pratique que très rarement le maltage, c'est un procédé long et complexe qui nécessite une spécialisation importante. Le brasseur achète ces céréales maltées.

Pour en savoir, beaucoup, plus sur le malt et le maltage (en anglais) :

- Le blog « [Ancien Malt and Ale](#) » de Merryn Dineley et notamment un article en 4 parties autour d'une conférence au Orkney Science Festival en 2016 sur le sujet : « [A morning with maltsters \(part 1\)](#) ». L'auteur est archéologue, brasseur amateur et ses sujets d'études sont le malt et la bière ; étonnant non ?
- Ainsi que le livre de référence « *Malts and Malting* » (1998) de Dennis Briggs

4.1. Germination et maltage

La première étape du maltage est de provoquer la germination des céréales afin que les processus biochimiques s'initient.

Lors de la germination, la graine de céréales crée des enzymes (notamment les [amylases](#), [cytases](#), [phosphotases](#) et [peptidases](#)).

Ces enzymes ont pour objectif naturel de transformer les réserves d'amidon du grain (endosperme) en sucres simples qui seront de l'énergie pour le grain afin de germer et de commencer sa croissance. Ces réserves sont utilisées par le végétal jusqu'à ce que celui-ci soit capable de se nourrir lui-même, en puisant dans les sols via ces racines.

Cette transformation nécessite plusieurs étapes et plusieurs enzymes, C'est un processus biochimique complexe.

Le maltage consiste à détourner cette voie biochimique naturelle et la stopper à son début afin de bénéficier ultérieurement du travail des enzymes pour créer les sucres nécessaires au moût de la bière.

D'un point de vue scientifique voir les chapitres « [Biochimie des céréales](#) » et « [Biochimie des Enzymes](#) » pour plus de détails.

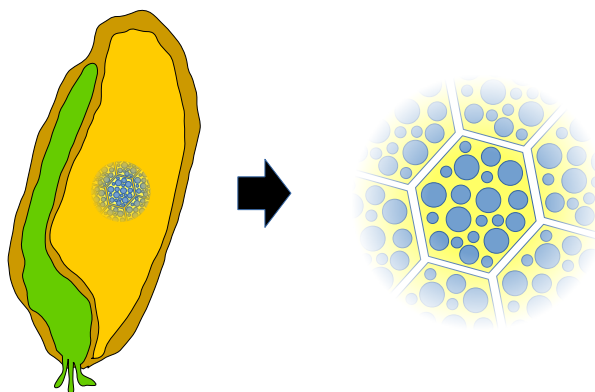


Figure 3: Cellule de l'endosperme contenant les granules d'amidon

4.1.a. Process de maltage

Le maltage consiste en plusieurs opérations successives :

- Trempage : humidification et oxygénation pendant 2 à 3 jours pour réactiver l'embryon en sommeil dans les grains de céréales ? Consiste en plusieurs cycles de trempage (12-14 °C) et d'oxygénation ;
- Germination (malt vert) : pendant 4 à 6 jours, les grains vont produire des enzymes spécifiques qui permettront ensuite de :
 - Liquéfier les enveloppes cellulaires pour rendre l'amidon accessible : [cytases](#), [xylanases](#) ;
 - Découper l'amidon en glucoses : [amylases](#) ;
 - Découper les protéines en acides aminés : [peptidases](#).
- Touraillage : interruption de la germination [réaction de Maillard](#) et [caramélisation](#)
 - Dessiccation (séchage) : de 40 à 50 °C pendant 24 à 30 h
 - Coup de feu : plus haute température pendant 2 à 4 h, suivant la température, l'humidité, la vitesse et la durée on obtient différents types de malts :
 - Malts de base : touraillage à sec, doux et lent (env. 85 °C) ;
 - Malts caramel : touraillage humide et long (env. 110 °C) ;
 - Malts torréfiés : touraillage sec, rapide et fort (env. 220 °C).
- Dégommage : opération mécanique pour retirer les germes.

On différencie les types de malt notamment par leur degré de cuisson (ou type de touraillage) et leurs couleurs.

Seuls les malts de base conservent un Pouvoir diastique (présence d'enzymes), les autres cuissons dénaturent les enzymes et donc ne participent pas directement à l'empâtage qui va suivre. Ils sont toutefois importants dans de nombreuses recettes pour leur apport en arômes, goûts et couleurs.

Historiquement le malt torréfié est une invention récente.

4.1.b. Analyser une fiche de malt

Référence : « *Understanding malt analysis sheet* » (probrewer.com)

Le malteur fournit généralement une fiche descriptive avec chaque lot produit afin de permettre au brasseur de connaître sa matière première. Ce type de fiche n'est pas souvent disponible au brasseur amateur qui achète à un revendeur de petites quantités, mais ça coûte rien de demander.

Les paramètres les plus importants sont : couleur, taux d'humidité, pouvoir diastique et taux de modification (souvent noté SNR ou S/T).

Origine et type

Indique l'origine géographique des céréales ainsi que leur type.

Pour les types d'orge voir le chapitre dédié : Orge, mais aussi le chapitre Introduction à la biochimie des céréales.

Couleur

Unité de mesure : degré Lovibond, SRM ou EBC

Indique la couleur des grains (surtout Lovibond) ou la couleur attendue de la maische (SRM ou EBC), voir le chapitre Unités spécifiques du brassage pour le détail de ces unités de mesures.

Taux d'humidité

Unité de mesure : %

Un bon malt doit avoir un taux d'humidité proche de 1,5 %; au-delà de 6 % (4 % pour les malts sombres) le risque de dégradation, lors du stockage, est important.

Extrait DBFG

Unité de mesure : %

Le rendement maximal possible (fine mouture). Apporte peu d'information. Éventuellement le ratio entre DBFG et DBCG permet d'estimer de taux de modification s'il n'est pas précisé.

Extrait DBCG

Unité de mesure : %

Le rendement normal atteignable (mouture moyenne), dans la réalité ce taux doit être réduit de 5 à 15 points suivant les installations. En effet même s'il est plus réaliste que le DBFG il reste issu d'essais en laboratoire dans des conditions très favorables.

Extrait à chaud HWE

Unité de mesure : °L/kg

Le rendement attendu d'un brassin à 20 °C, utilisé par les malteurs anglais à la place du DBCG. Exprimé en degré Lovibond par kilogramme.

Conversion : $DBCG \approx \frac{HWE}{386}$

Pouvoir diastique

Unité de mesure : WK ou °L

Le degré de transformation de la céréale ; indique son potentiel enzymatique pour transformer la maische, mesuré en unité WK ou degré Lintner), voir le détail au [Chapitre sur les unités spécifiques de brassage](#).

Protéines ou azote total

Unité de mesure : %

Le taux total de protéines (1 protéine = 0,156 azote, soit 6,28 g de protéines contiennent en moyenne 1 g d'azote). Des taux supérieurs à 12 % (ou 1,9 % équivalent azote) risque de provoquer un trouble. Un taux de 10 % est un bon compromis entre le risque de trouble de la tenue de la mousse.

Protéines ou azote soluble

Unité de mesure : %

Le taux de protéines solubles (1 g protéine contient 0,156 g d'azote).

Permet de calcul le ratio Soluble/Total, voir paramètre suivant S/T.

Taux de modification ou Ratio d'azote soluble (SNR ou S/T)

Unité de mesure : %

C'est le ratio entre les protéines (ou azotes suivant la référence des taux) soluble et leur total (abréviation SNR ou S/T) ; aussi dénommé Modification du malt ou taux de modification. Un taux élevé indique un malt bien modifié lors du procédé de maltage.

Durant le maltage, des enzymes vont dégrader, partiellement, les protéines de l'endosperme et créer des acides aminées solubles. Ces acides aminés solubles mesurées comme des **FAN** (*Free Amino Nitrogen* ou acides azotés libres).

La modification du malt est un indicateur de son degré de germination, notamment de la transformation des protéines. La mesure la plus indicatrice est le rapport entre la quantité de protéines solubles et le total de protéines (soluble et insoluble), aussi appelé S/T (*Soluble / Total*) ou SNR (*Soluble Nitrogen Ratio*) ou encore indice de *Kolbach* (KI). Ceci indique la modification qu'on subit les protéines lors du maltage et donc leur degré de préparation pour réaliser un bon empâtage. Ce rapport S/T mesure en sorte l'état d'éclatement de l'endosperme et donc la facilité d'accès à l'amidon.

Un faible taux de modification peu nécessite un palier protéinique lors de l'empâtage (pour laisser les enzymes agir sur les protéines).

Tableau 3: Table des taux de modification du malt

S/T	Modification	Conseils d'optimisation de l'empâtage	
		Palier protéinique 50 à 55 °C	Palier de saccharification 65 à 68 °C
< 36 %	faible	20 à 30 minutes	Plutôt décoction

36 à 40 %	modérée	10 à 15 minutes	2 paliers conseillés
40 à 44 %	bonne	Pas utile	1 seul palier
44 à 48 %	haute	À éviter	1 seul palier

Les spécialistes peuvent estimer visuellement le degré de modification par la boursoufflure du grain malté qui commence à la base de la zone du germe et grossit vers le sommet du grain.

Ces indices marquent l'avancée de la protéolyse (dégradation des protéines longues en chaînes plus courte) elle n'indique rien sur la nature de celles-ci et leurs effets bénéfiques ou non.

Une estimation indirecte est le pouvoir diastique ou le ratio DBFG/DBCG, car les 2 paramètres sont très liés.

4.1.c. Céréales crues (non maltées)

Les céréales dites crues, sont des céréales non maltées. La germination n'ayant pas commencé, ces céréales ne contiennent presque aucun enzyme (voir aucun) ce qui ne permet pas la saccharification.

Les céréales crues existent souvent soit sous forme de grains brut, de flocons ou de farine.

- Les grains nécessitent d'être préalablement concassés puis gélifiés, soit trempé et porter a une température permettant la liquéfaction des enveloppes cellulaires de l'amidon qui sinon sera inaccessible. Cette température est spécifique a chaque céréale ;
- Les flocons sont déjà pré-cuits et peuvent être utilisé directement ;
- La farine, doit simplement être trempé et mélangé doucement pour ne pas former des grumeaux (peut rendre le filtrage difficile).

L'utilisation de céréales crues nécessite l'ajout de céréales maltées pour apporter les enzymes nécessaires à la saccharification. Il faut respecter un pouvoir diastique global de 120 °W, voir le détail au [Chapitre sur les unités spécifiques de brassage](#)).

4.2. Processus chimique de cuisson

Lors de la préparation des malts, s'opèrent plusieurs réactions chimiques qui modifient la couleur et les arômes du malt en devenir. Réactions que l'on retrouve lors des étapes d'empâtage et de cuisson.

4.2.a. Réaction·s de Maillard

Référence : [wikipedia](#)

En chimie alimentaire, la **réaction·s de Maillard**, appelée aussi **glycation**, est une réaction chimique très complexe qui se produit dans presque tous les aliments, résultant de la condensation initiale entre le groupement amine des composés organiques (acides aminés, protéines) et le groupement carbonyle de sucres réducteurs (glucose, fructose, lactose, ribose). À ne pas confondre avec la caramélisation qui est un processus différent (vois plus bas).

On l'observe notamment dans des aliments soumis au chauffage ou à la cuisson, conduisant à leur brunissement (croûte du pain, viande grillée, couleur doré de la bière...). Mais aussi parfois, à température ambiante, dans ceux de longue conservation. Ces réactions se produisent à toutes températures mais sont accélérés par la chaleur.

Cette réaction organique créant finalement des « *produits de la réaction de Maillard* » (molécules aromatiques et mélanoïdines, pigments bruns de structure mal connue). Produits qui sont responsables de la production des odeurs, des arômes et des pigments caractéristiques des aliments chauffés, cuits.

Cette réaction peut aussi donner naissance à des composés indésirables, voir cancérigènes (acrylamides, hydrocarbures polycycliques, amines hétérocycliques) et également réduire la valeur nutritionnelle des aliments en dégradant des acides aminés essentiels.

Cette réaction de Maillard est mis en œuvre au stade du maltage (c'est ce qui donne leur couleur aux grains maltés et donc à la bière) mais aussi plus tard lors de l'ébullition. On considère souvent que l'ébullition ajoute de +7 à +11 EBC suivant les procédés.

Ces réactions se déroulent en plusieurs phases :

Condensation

Les réactions de Maillard commencent par une première étape de condensation où le groupe carbonyle des sucres réagissent avec les groupes amines de l'acide aminé (protéines), produisant des glycosylamines et de l'eau.

Réarrangement d'Amadori

À la seconde étape, les glycosylamines subissent une réaction de réarrangement d'Amadori pour former des imines (cétoamines et aldosaamines).

Scission et déshydratation

La suite des réactions comportant plusieurs voies :

- Scission : coupures des cétoamines et aldosaamines en petites molécules carbonylées ou acides ; qui par condensation aldolique donneront des polymères et produits odorants typiques de la réaction de Maillard.
- Déshydratation forte : Par chauffage en milieu acide, les cétoamines donnent naissance à des substances de type furaldéhyde ou déshydrofuraldéhyde ;
- Déshydratation modérée : Lorsque la déshydrogénation est plus modérée, des substances réductrices sont obtenues : réductones et déshydroréductones. Celles-ci réagissent avec des acides aminés et entraînent leur dégradation par décarboxylation et transformation en aldéhydes (réaction de Strecker).

Scission et polymérisation

La poursuite des réactions de scission crée des produits volatils et odorants.

Les résidus des condensations aldoliques aboutissent aux mélanoidines qui sont caractéristiques des couleurs brunes obtenus par les réactions de Maillard.

Résumé

Les produits de la réaction de Maillard confèrent aux aliments des propriétés, le plus souvent intéressantes, telles que la couleur, l'arôme, la valeur nutritionnelle et une certaine stabilité au cours de la conservation (pouvoir antioxydant).

De manière générale plus le sucre réducteur possède de carbone moins la réaction de Maillard est facilitée. Ainsi l'amidon est peu réactif, alors que les pentoses (5 carbones) sont très réactifs.

Pour les acides aminés c'est surtout l'éloignement de la fonction amine et la fonction acide carboxylique qui accélère les réactions.

L'eau est indispensable à certaines étapes de la réaction. Le meilleur taux se situe entre 30 et 60 %.

La vitesse des réactions est liée directement à la température.

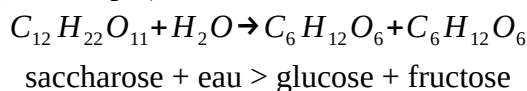
4.2.b. Caramélisation

Référence : [wikipédia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Caram%C3%A9lisation)

La caramélisation est une réaction chimique qui correspond au brunissement du saccharose. À ne pas confondre avec la réaction de Maillard (ci-dessus).

Elle résulte d'une déshydratation intramoléculaire du saccharose, avec formation de dianhydrides de fructose, puis leur liaison avec les résidus du glucose. Réaction plus simple que la réaction de Maillard.

Cette réaction se produit à partir d'une température spécifique pour chaque sucre et en présence d'un catalyseur acide (acide citrique par exemple).



S'il y a excès d'eau, celle-ci s'évapore.

S'il y a déficit d'eau, le sucre déshydraté devient du carbone : $C_{12}H_{22}O_{11} \rightarrow 12C + 11H_2O$

Le mélange glucose et fructose obtenu (sucre inverti) se recombine ensuite à haute température, pour former des sucres très complexes (oligosaccharides et polydextroses), constituant du caramel et à l'origine de sa couleur brune.

Tableau 4 : Températures de caramélisation

Sucre	Fructose	Galactose	Glucose	Maltose	Saccharose
Température (°C)	110	160	160	180	160

5. Concassage des céréales

Le concassage des céréales consiste à broyer le mélange de grains afin de rendre le contenu des grains plus accessibles à l'eau de la maische et aux enzymes. Il s'agit de broyer les grains (endosperme et germe) le plus fin possible, tout en conservant l'écorce (tégument) la plus intacte pour permettre une filtration naturelle. Voir aussi Anatomie d'un grain de céréale

5.1. Moulin

À développer.

Un broyage trop rapide peut entraîner un échauffement important pouvant conduire à une légère réaction de Maillard qui va dénaturer l'amidon et augmenter la couleur désirée.

L'objectif du moulin est de briser (concasser) les grains durs de céréales et malts, tout en laissant le plus intact possible l'enveloppe du grain. Ces résidus d'enveloppes serviront de filtre lors de l'étape de filtration.

5.2. Finesse du concassage

Le concassage est une étape importante qui va avoir des effets, notamment, sur :

- Le filtrage (voir chapitre Filtrage et rinçage) : une mouture fine va ralentir la filtration, voir le bloquer et va apporter du trouble à la bière finale.
- Le rendement : Une mouture grossière va réduire le rendement, que l'on peut compenser par un empâtage plus long.

Le filtrage peut être amélioré en ajoutant des enveloppes de grains de riz (que l'on trouve en magasin spécialisé), mais aussi en humidifiant légèrement les grains avant broyage (« *malt conditioning* »).

5.3. Humidification du grain (malt conditioning)

On peut améliorer le filtrage et le rendement en préparant les grains 30 minutes avant le concassage. Il s'agit d'humidifier les grains avec un peu d'eau que l'on pulvérise sur les grains tout en les mélangeant.

Il faut appliquer de 2 % de leur poids en eau et bien mélanger.

Il faut ensuite laisser reposer de 20 à 30 minutes pour que les coques s'humidifient bien.

Le concassage doit être réalisé tout de suite après cette période de repos : les coques sont alors ramollies et ne sont plus concassées mais « glisse » du grain. Le filtrage sera bien plus efficace et rapide et cela réduit les polyphénols.

Il ne faut pas laisser le grain humide trop longtemps car en une nuit pourrait s'amorcer une acidification ou pourrissement des grains.

Avantage : meilleur filtrage (enveloppe plus intacts)

Inconvénient : le concassage est un plus difficile

6. Empâtage

Références : [BrauKaiser](#) (EN) et [Univers Bière](#) (FR)

Le brassage consiste à transformer la maïsche (mélange de grains et d'eau) en moût (liquide sucré) pour l'étape suivante de fermentation. **L'empâtage** c'est l'étape de transformation de l'amidon en sucres simples qui sera suivi par une filtration pour obtenir le moût.

Lors de l'empâtage, le phénomène biochimique principal sera la décomposition des glucides (principalement amidons) en sucres simples et la réduction des protéines par des phénomènes d'hydrolyse, réalisée par des enzymes naturellement présentes dans le malt.

6.1. Principes généraux

6.1.a. La maïsche

La maïsche est un mélange de malts concassés et d'eau, il est donc composé essentiellement :

- Eau, env. 75 % ;
 - Eau pure (H_2O) ;
 - Minéraux dissous (voir chapitre [Chimie des minéraux importants](#)) ;
- Céréales, env. 25 % ;
 - Enveloppe de céréales (celluloses et tanins), 4 % ;
 - Amidon (chaînes de glucides), 20 % ;
 - Protéines (chaînes d'acides aminés), 1 % ;
 - Vitamines et minéraux plus ou moins dissous ;

6.1.b. Étapes de l'empâtage

Étapes de l'empâtage (au fur et à mesure de l'augmentation de température) :

- **Dispersion** (*dough-in*) : les céréales absorbent l'eau, les enveloppes des cellules de l'endosperme se liquéfient sous l'action de l'humification et de certaines enzymes ;
- **Gélatinisation** : les granules d'amidon sont dénaturés et l'amidon devient libre, la solution devient visqueuse (réaction forte à l'iode) ;
- **Liquéfaction** : le moût devient plus liquide au fur et à mesure que l'amidon est transformé en sucres de moins en moins complexes (réaction moyenne à l'iode) ;
- **Saccharification** : décomposition des sucres complexes en sucres simples (réaction faible à l'iode).

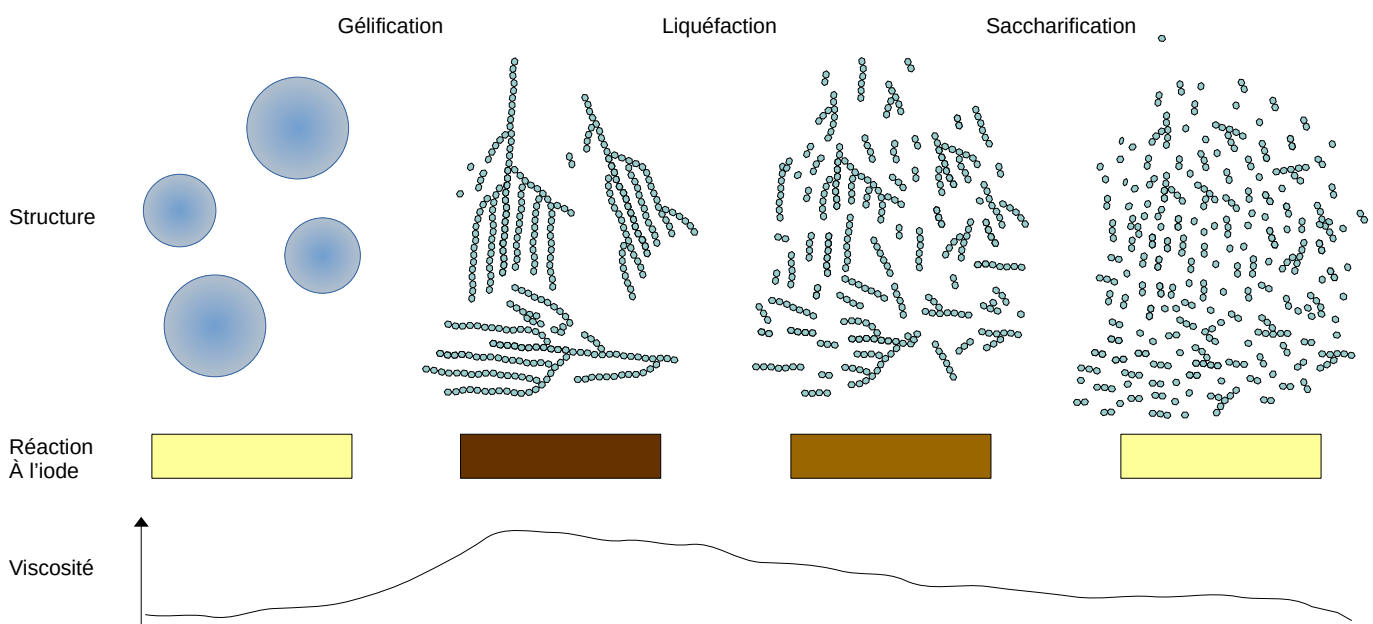


Figure 4: Évolution des glucides lors de l'empâtage (adapté de Univers Bière)

Les granules d'amidon, présentes dans les céréales, sont presque insolubles dans l'eau froide. Chauffé, et à partir de 45-50° C, ces granules vont absorber de plus en plus d'eau et gonfler (jusqu'à 30 fois leur poids initial). Avec l'aide d'enzymes (**lesquelles ?**) la couche externe de ces granules commencent à se décomposer en lamelles gélatineuses, rendant l'amidon accessible et soluble et la solution plus visqueuse. Dès que les granules gélifient, les enzymes de saccharification entrent en action pour réduire les longues chaînes d'amidon en chaînes de plus en plus courtes (jusqu'aux sucres simples). Ce processus va rendre la solution plus liquide.

Les enzymes contenus dans la maische vont, dans les bonnes conditions (température, pH et rapport eau-grains) :

- Hydrolyser les glucides en sucres plus simples, sucres fermentescibles (maltoses, glucoses et fructoses) et sucres non fermentescibles (dextrines, maltotriose, maltotetraose...) ;
- Découper les protéines en peptides et acides aminés simples.

Plus de détails dans les chapitres Introduction à la biochimie des céréales et Introduction à la biochimie des enzymes

6.1.c. Glucides principaux du moût

Tableau 5 : Principaux glucides présents dans le moût

Glucide	Formule brute	Ferment escible	Description	% dans le malt	% dans le moût
Amidon		non	Polysaccharide composé de longues chaînes de glucoses essentiellement : amylose et amylopectine	86	< 1
Amylose	(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n	non	Polymère non ramifié de molécules de glucoses (liaisons 1-4)	-	-
Amylopectine	(C ₃₀ H ₅₂ O ₂₆)	non	Polymères ramifiés de glucoses, forme une branche dans l'amidon ou des dextrines (liaisons 1-4 et 1-6)	-	-
Dextrines	(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n	non	Composé un peu comme l'amidon mais en très court : 1 amylopectine liant quelques amyloses	3	22
Maltotriose, Maltotetraose ...	(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n	parfois	Ce sont des amyloses courtes, donc des petites chaînes de quelques glucoses	1	20
Maltose	(C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁)	oui	2 glucoses	1	40
Saccharose ou sucrose	(C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁)	oui	1 glucose + 1 fructose, c'est le sucre de table classique	5	5
Glucose et Fructose	(C ₆ H ₁₂ O ₆)	oui	Sucres simples	4	10

6.1.d. Enzymes principaux du moût

Les enzymes du malt ont pour rôles naturels de préparer les réserves de nourriture du grain pour devenir une nouvelle plante. Dans le brassage ces enzymes sont détournés de leur rôle pour transformer les réserves en sucres digestibles par les levures.

Voir le chapitre sur la [Biochimie des enzymes](#) pour plus de détails sur leur fonctionnement.

Tableau 6 : Principaux enzymes du malt et leurs caractéristiques

Enzymes	Plage de travail	Température optimale	Fonction	Type
α-amylase	60 à 75 °C	60 à 70 °C	Hydrolyse aléatoirement les chaînes de glucoses suffisamment longues : brise les liaisons (1-4) des : • Amylose > amylose, maltose, maltotriose... • Amylopectine > maltose, glucose et dextrines	Enzyme principale
β-amylase	55 à 65 °C		Hydrolyse les chaînes de glucoses par une extrémité libre en extrayant 2 glucoses : • Amylose > amylose, maltose	Enzyme secondaire

			Dextrine > dextrine, maltose	
Dextrinase	60 à 67 °C	60 à 65 °C	Brise les liaisons (1-6) des : Amylopectine > maltose, glucose et dextrans	Enzyme peu active
Maltase	30 à 40 °C		Brise le maltose > 2 glucoses	Peu efficace car peu de glucose à ce stade et la maltose est assimilable par les levures
Proteinase Peptidase	20 à 67 °C	45 à 55 °C	Brise les liaisons peptidiques des protéines : - Protéines > protéines plus courtes et acides aminés - Créer des FAN à partir des protéines	
β-glucanase	20 à 50 °C	40 à 48 °C	Brise les parois cellulaires des granules d'amidon, réduit la viscosité du moût et rend accessible l'amidon aux autres enzymes.	

Activité des enzymes de la mouture (°C)

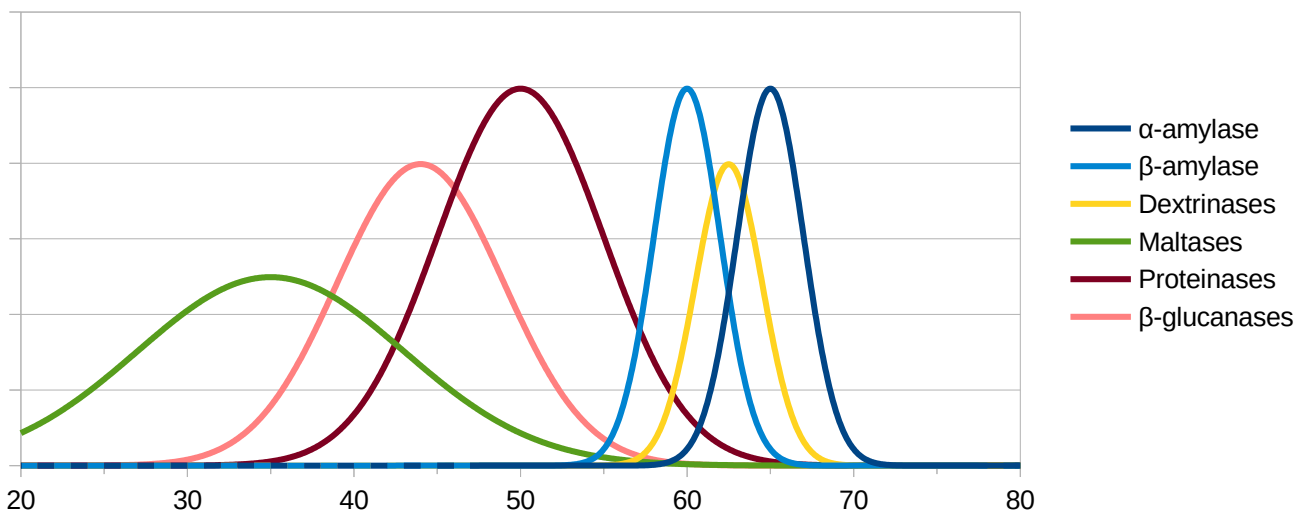


Figure 5 : Diagramme de l'activité de chaque enzyme en fonction de la température (°C), en supposant l'acidité optimale.

6.1.e. Réduction de l'eau

Les réactions enzymatiques qui nous intéressent étant de type hydrolyse, chaque réaction consomme 1 molécule d'eau. Ce qui va réduire quelque peu le volume de la mouture. Ainsi l'empâtage de 1 kg de malts d'orge va consommer environ 50 ml d'eau ; on considère environ 1 à 2 % de perte.

6.2. Préparation de l'eau pour l'empâtage

La mouture doit être équilibrée pour permettre la préparation d'un moût de qualité. Notamment l'acidité du brassin doit être optimale ainsi que les teneurs en minéraux qui fourniront la nourriture des levures.

Pour mieux comprendre ce qui suit, il est conseillé de lire le chapitre dédié à la [Chimie de l'Eau](#) et particulièrement le chapitre sur [l'Équilibre d'acidité](#)

6.2.a. Alcalinité, dureté et styles

Lorsque l'on ajoute les grains à l'eau pour former la mouture, il se produit une acidification de la solution. Plus les malts seront sombres plus ils sont acides ; plus il y a de céréales et plus c'est acide. Au départ cette acidification entraîne les ions Calcium et Magnésium « libre » (mesuré par la dureté temporaire) à s'associer aux ions bicarbonates disponibles (mesuré par l'alcalinité), ce qui équilibre la solution en « absorbant » une partie de l'acidité, on parle d'un « effet tampon ».

On arrive alors possiblement, suivant le potentiel acide des grains et les paramètres de l'eau, à une situation de « saturation » : soit il n'y a plus de bicarbonates, soit il n'y a plus de calcium ou magnésium libre ; soit (plus rare) toute l'acidité a été absorbée.

L'alcalinité résiduelle (RA) est une mesure de la force de cet effet tampon et permet d'estimer si le brassin sera équilibré en acidité.

Suivant le type de bière (style) il y a un RA conseillé. Ce RA n'est pas une invention ex-nihilo, historiquement il correspond à la composition de l'eau d'où est originaire géographiquement le style. Ainsi les Stouts d'Irlande sont définis par un RA très élevé, car les eaux disponibles sont très carbonatées et parfaitement adapté pour absorber l'acidité forte des maïs très brunes. C'est une partie intégrante du style. Le RA est plus lié à la couleur de la bière qu'au style proprement dit, toutefois il faut se méfier de certains styles qui ajoutent des « colorants » (comme certaines belge-trappistes qui utilisent des sucres candis très sombre qui produisent une bière sombre mais dont le maïs n'est pas acide).

Règles « générales » :

La dureté est plutôt bonne pour la maïs, elle abaisse le pH.

L'alcalinité est plutôt mauvaise pour la maïs, elle augmente le pH.

Le pH de la maïs est un indicateur de l'équilibre entre la dureté et l'alcalinité.

Le pH de l'eau brute importe peu.

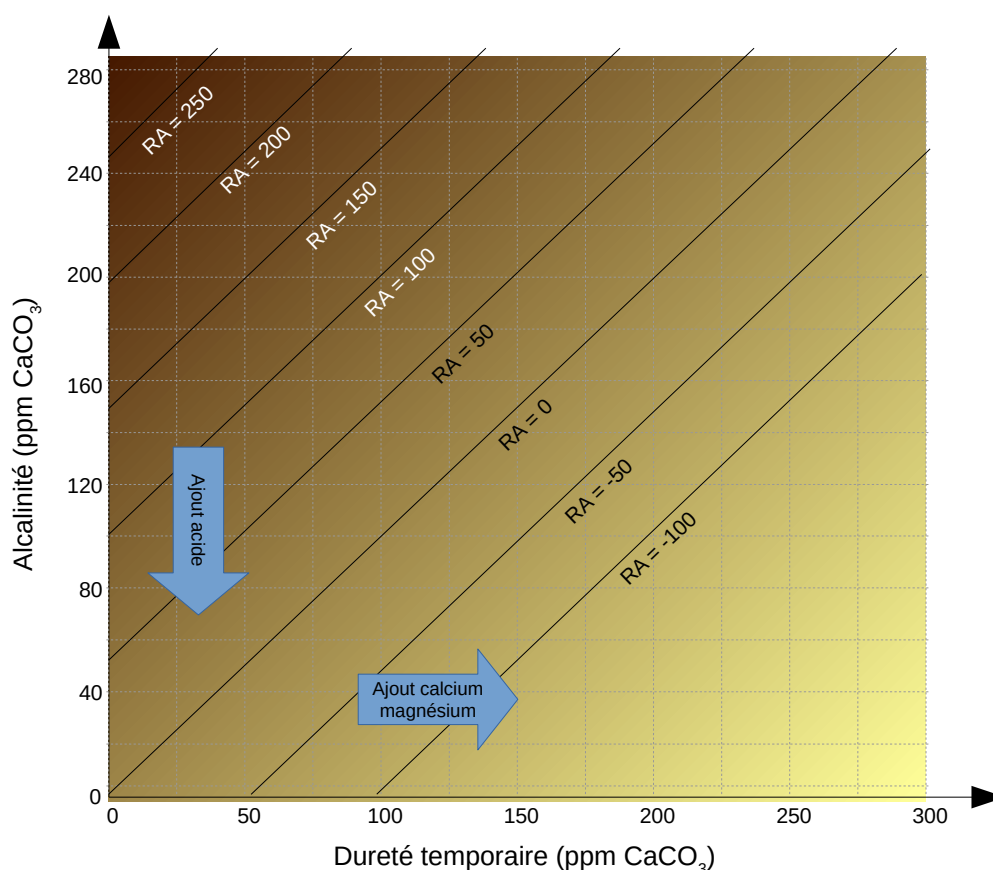


Figure 6: Couleur de la bière conseillée suivant le RA

6.3. Ajustements de l'eau de brassage

C'est l'ensemble des procédés permettant d'ajuster le profil de l'eau de brassage pour obtenir une maïs équilibrée et correspondant au style recherché. C'est une opération pas forcément nécessaire, mais qui peut permettre d'améliorer gustativement certaines bières.

La première étape consistera à connaître l'équilibre acide (pH) du moût.

6.3.a. Estimer l'acidité de la mouture

L'ajout des céréales dans l'eau va acidifier la solution aqueuse.

Plusieurs praticiens et théoriciens ont formulés des calculs empiriques qui permettent d'estimer l'acidité globale de la mouture avant de réaliser le brassin, ce qui permet d'anticiper et de prévoir des ajustements.

Effet du grain

Acidification des malts en mEq / litre de malt

- Malts de base : $0,28 \times \text{Lovibond}$
- Malts « cristal » : $0,21 \times \text{Lovibond} + 0,25$
- Malts grillés : 19
- Malts acidifiants : 95

Effet des minéraux de l'eau et du ratio grains/eau

Le RA (alcalinité résiduelle) a un effet direct sur l'acidité de la mouture, effet lié au ratio grain/eau.

- Ratio : 2 L/kg, +0,1 pH avec 130 ppm CaCO_3
- Ratio : 4 L/kg, +0,1 pH avec 75 ppm CaCO_3

Soit :
$$\Delta\text{pH} = \frac{\text{Volume} \times \text{RA}}{\text{Poids} \times 50 \times 50} = \frac{\text{Ratio}}{2500} \times \text{RA}$$

6.3.b. Aération

L'eau municipale du robinet contient souvent du chlore libre qui permettent de garantir une non-contamination bactérienne de l'eau distribuée. Toutefois cela donne un goût désagréable à l'eau. Pour le brassage il convient d'éliminer au maximum ce chlore. Le chlore libre est volatil et s'évapore facilement.

L'aération permet d'évacuer le plus gros du chlore contenu dans l'eau du robinet.

C'est une opération très simple, qui permet d'éliminer le goût et odeur de chlore. Il suffit de laisser l'eau se reposer à l'air libre pendant quelques heures.

On peut optimiser l'efficacité en brassant l'eau ou encore mieux en la portant à ébullition (voir paragraphe suivant).

On trouve aussi des chloramines (chlore total-chlore libre) qui elles ne s'éliminent que difficilement. Les chloramines ne sont pas autorisées en France pour l'eau potable (aux États-Unis si par contre) ; on en trouve toutefois quelques traces « naturelles » c'est du chlore libre qui réagit avec des substances type ammoniac. La chloramine ne peut être éliminée qu'avec un filtrage au charbon actif.

6.3.c. Ébullition

L'ébullition de l'eau brute permet de réduire l'alcalinité du moût et aussi de réduire le chlore (par évaporation). Cette réduction de l'alcalinité va toutefois s'accompagner d'une réduction du calcium qui peut être néfaste (réduction de la dureté).

C'est un ajustement simple pour une eau très alcaline et très minérale (cas commun en France).

Le principe est de précipiter les bicarbonates par une forte ébullition. C'est une méthode très ancienne bien avant que l'on connaisse les notions d'alcalinité. L'ébullition de l'eau va permettre aux bicarbonates de réagir avec les ions Calcium et Magnésium et ainsi de se transformer en calcaire solide (craie).

Voir les détails de la chimie de l'eau dans le [chapitre dédié](#).

Un tourbillon et un refroidissement naturel vont permettre de centrifuger les calcaires solides et former un amas au fond de la marmite (phénomène de tourbillon, voir le [chapitre dédié](#)) ; un siphonnage de cette eau (sans prélever l'amas de calcaire) permet d'obtenir une eau décarbonatée (et décalcarisée).

Déséquilibre de l'eau et pouvoir tampon

On peut comprendre le phénomène en regardant l'équation d'équilibre des carbonates :

- L'ébullition forte va faire évaporer le CO_2 et le Chlore dissout dans l'eau ;
- La réduction de CO_2 va déséquilibrer l'acidité de l'eau et provoquer par contre réaction d'équilibrage, la transformation de bicarbonates en acides carboniques et CO_2 ;

- Ce qui augmente l'acidité (pH) ;
- Ce qui entraîne le découpage d'ions bicarbonates en carbonates pour rétablir l'équilibre ;
- Les carbonates réagissent alors avec le CO_2 et forme du calcaire (CaCO_3) qui étant solide précipite ;
 - L'équation globale se résume par : $\text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3$
- Cet enchaînement de réactions va se produire jusqu'à des concentrations minimales de 1 mEq/L en Calcium (20 ppm) ou Bicarbonates (61 ppm).

Ce système est très efficace mais peu précis et il présente en outre l'inconvénient de réduire les calciums ce qui peut entraîner un déséquilibre en calcium (réduction de la dureté).

En effet si le phénomène de précipitation se produit au maximum, il va se terminer soit en ayant consommé tous les carbonates (jusqu'à 61 ppm), soit par manque de Calcium (jusqu'à 20 ppm).

Mise en œuvre optimale

Ce système est optimal lorsque :

1. La dureté totale est supérieure à l'alcalinité totale (ppm CaCO_3)
2. La dureté permanente est supérieure à la dureté temporaire

Si ce n'est pas le cas, on pourra mélanger l'eau décarbonatée par ébullition avec de l'eau brute pour retrouver un taux minimal de Calcium, ce qui permet d'obtenir un compromis.

On peut estimer la concentration en Calcium à la fin de l'opération en considérant que tout se passe au mieux (forte ébullition pendant 30 minutes). Dans ce cas, théoriquement on va descendre jusqu'à une concentration finale de bicarbonates de 61 ppm ; on considère plutôt un cas réel avec 80 ppm.

$$Ca_{\text{final}} = Ca_{\text{initial}} - \left(\frac{\text{Alcalinité}_{\text{initiale}} - \text{Alcalinité}_{\text{finale}}}{\frac{61}{20}} \right), \text{ soit : } Ca_{\text{final}} = Ca_{\text{initial}} - \left(\frac{\text{Alcalinité}_{\text{initiale}} - 80}{3,05} \right)$$

6.3.d. Malts acides

Les malts acidulés (sauermalz) permettent de réduire le pH, car ils contiennent de l'acide lactique (2 à 3 %). 1 % de malt acide abaisse le pH de 0,1.

Ce qui permet de lutter aussi contre une eau trop alcaline, cette fois-ci sans toucher à la concentration en calcium.

6.3.e. Palier acidifiant

Lors de l'empâtage il est possible d'acidifier la maische avec un palier acidifiant. A développer.

6.3.f. Dilution

L'eau distillée est une eau ne contenant plus aucun minéral, elle est ainsi impropre brasser (il faut des minéraux). Toutefois elle peut permettre par dilution avec l'eau courante d'en abaisser la minéralité. C'est un procédé simple qui a l'inconvénient d'abaisser tous les minéraux. Il est alors possible de composer avec des sels.

On peut aussi diluer l'eau brute avec de l'eau brute préalablement décarbonatée par ébullition.

6.3.g. Ajout de sels minéraux

Les sels de qualité alimentaire permettent d'ajuster certains minéraux des eaux brutes et aussi d'ajuster le pH du moût. Les sels sont souvent des additifs alimentaires industriels usuels (autorisés et identifiés par un code international de type Exxx défini par le *Codex Alimentarius*).

Ce sont des composées chimiques ioniques, c'est-à-dire des ions liés faiblement entre eux et par leur solubilité dans l'eau se séparent facilement sous leur forme ionique apportant des éléments supplémentaires à l'eau brute. Certains de ces ions vont contribuer à modifier l'acidité de la solution et d'autres à ajouter des éléments minéraux à la solution.

L'objectif étant d'atteindre le profil minéral désiré.

Toutefois leur effet est très fort et les dosages nécessaires très faibles, cela nécessite beaucoup de précisions.

Tables des sels

Légende du tableau :

- La colonne E, indique la référence internationale d'additif alimentaire
- La colonne F indique la formule chimique brute.
- La colonne M indique le poids moléculaire de la substance avant solubilisation
- La colonne C1 indique les concentrations espérées (en ppm, soit en mg/L) pour l'ajout de 1 g de la substance concernée.
- La colonne A, indique le poids équivalent (obsolète)
- La colonne RA
- La colonne S, indique la solubilité maximale (conditions standards) soit le maximum que l'on pourra rendre soluble dans l'eau.

Tableau 7 : Principaux sels et leurs caractéristiques

Désignations	Code additif alimen-taire	Formule Brute	Masse molécu-laire	Concentration pour ajout de 1 g/L								A	RA
	E	F	M g/mole	C1 (g pour 1 g/L)								A mEq/L	DRA mEq/L
				Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	OH ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Na ⁺		
Carbonate de calcium, Blanc de Meudon	E170	CaCO ₃	100,0	0,4			0,16					20	
Bicarbonate de sodium, Bicarbonate de soude	E500	NaHCO ₃	84,0			0,71					0,27	11,8	
Hydroxyde de calcium, chaux éteinte	E526	Ca(OH) ₂	74,1	0,54				0,46				27	19,3
Hydroxyle de sodium, soude caustique, soude	E524	NaOH	40,0						0,43		0,57	25	
Sulfate de calcium, Gypse	E516	CaSO ₄	172,2	0,23					0,56				
Sulfate de magnésium, Sel Epsom	E518	MgSO ₄	246,5		0,99				0,39				
Chlorure de calcium	E509	CaCl ₂	147,0	0,27						0,48			
Chlorure de magnésium	E511	MgCl ₂	203,3		0,12					0,35			
Chlorure de sodium, Sel de table		NaCl	58,4							0,61	0,39		

Exemple de calcul

Ainsi par exemple le sel de table (NaCl) qui est composé des ions Na⁺ et Cl⁻ ; une fois solubilisé dans l'eau il apporte 1 ion Na⁺ et un 1 ion Cl⁻ pour 1 molécule NaCl.

Soit l'équation chimique suivante : $1 NaCl \Rightarrow 1 Na^{+} + 1 Cl^{-}$, dont l'unité est la mole.

Pour connaître l'apport en Na et Cl (qui est exprimé pour l'eau brute en ppm) il faut ramener l'équation chimique en équation chimique de masse.

Cela se fait avec les masses molaires, soit : $58,4 g(NaCl) \Rightarrow 23 g(Na^{+}) + 35,4 g(Cl^{-})$,

soit l'équation en masse : $1 g NaCl \Rightarrow \frac{23}{58,4} Na^{+} + \frac{35,4}{58,4} Cl^{-}$, ou : $1 g NaCl \Rightarrow 0,3934 g Na^{+} + 0,606 g Cl^{-}$

Donc 1 g de sel apporte 0,3934 g d'ions Na⁺ et 0,606 g d'ions Cl⁻.

Description des sels principaux

Tous les sels comportant un élément hydrogène (H) dans leur formule brute auront un effet sur le pH.

Nom	Carbonate de Calcium	Bicarbonate de sodium	Hydroxyde de calcium
Nom commun	Blanc de Meudon, calcaire	Bicarbonate de soude	Chaux éteinte, chaux aérienne

English	Calcium carbonate, limestone	Baking soda	Slacked lime, pickle lime
Référence	wikipédia	wikipédia	wikipédia
Formule Brute	$CaCO_3$	$NaHCO_3$	$Ca(OH)_2$
Masse moléculaire	100,0 g/mole	84,0 g/mole	74,1 g/mole
Résidus après solubilisation	Ca^{2+} CO_3^{2-}	Na^+ HCO_3^-	Ca^{2+} $2 OH^-$
Solubilité max (eau 20 °C)	14 g/L Faible solubilité dans l'eau pure, moyenne dans le moût	87 g/L Très soluble	1,8 g/L Très peu soluble
Additif alimentaire	E170 Agent de blanchiment / colorant blanc	E500 Agent de gonflement pour les levures chimiques, régulateur de pH, générateur potentiel de CO_2 dans les boissons gazeuses...	E526 Agent d'absorption du CO_2 , régulateur de pH et affermissant/stabilisant.
Commentaires	Composé majoritaire de la calcite, du calcaire et de la craie, des coquilles d'œufs, des os... Quasiment aucun effet sur le pH.	Efficace pour augmenter l'alcalinité et le pH du moût. Ajouter dans l'eau avant empâtage.	Très alcalin

Nom	Hydroxyle de sodium	Sulfate de calcium	Sulfate de magnésium
Nom commun	Soude caustique	Gypse	Sel d'Epsom
English	Caustic soda	Gypsum	Epsom salt
Référence	wikipédia	wikipédia	wikipédia
Formule Brute	$NaOH$	$CaSO_4 \cdot 2 H_2O$	$MgSO_4 \cdot 7 H_2O$
Masse moléculaire	40,0 g/mole	172,2 g/mole	246,5 g/mole
Résidus après solubilisation	Na^+ OH^-	Mg^{2+} SO_4^{2-}	Mg^{2+} SO_4^{2-}
Solubilité (eau 20 °C)	1 080 g/L Très soluble.	2,5 g/L Légèrement soluble	250 g/L Soluble dans l'eau
Additif alimentaire	E524 Contrôle des milieux alcalins ou régulation d'acidité.	E516	E518
Commentaires	Augmente l'alcalinité. Sel dangereux à manipuler, son contact direct peut détruit les tissus organiques.	Un minéral composé de sulfate dihydraté de calcium. Permet d'abaisser le pH du moût, bien diluer par agitation vigoureuse.	Permet de réduire le pH du moût.

Nom	Chlorure de Calcium	Chlorure de Magnésium	Chlorure de Sodium
Nom commun	Sel de calcium	Sel de magnésium	Sel de table
English	Calcium chloride	Magnesium chloride, nigari	Canning salt
Référence	wikipédia	wikipédia	wikipédia
Formule Brute	$CaCl_2 \cdot 2 H_2O$	$MgCl_2 \cdot 6 H_2O$	$NaCl$
Masse moléculaire	111 g/mole	95,2 g/mole	58,4 g/mole
Résidus après solubilisation	Ca^{2+} $2 Cl^-$	Mg^{2+} $2 Cl^-$	Na^+ Cl^-
Solubilité (eau 20 °C)	745 g/L Très soluble	542 g/L Très soluble	358 g/L Très soluble

Additif alimentaire	E509 Gélifiant, affermissant, stabilisant et épaississant	E511 Coagulant	Exhausteur de goût
Commentaires	Augmente la dureté	Réduit le pH.	D'un goût âcre et d'une saveur caractéristique. C'est un exhausteur de goût : il diminue l'amer et le sucré, pondère l'acide et participe à l'intensification de l'umami. Les ions Na ⁺ stimulent les papilles tandis que les ions Cl ⁻ donnent le goût salé.

6.3.h. Ajout d'acides

L'ajout d'acide dans l'eau permet d'ajuster l'alcalinité de la mouture.

A développer.

Acides hydrochloric

Acide lactique

Acide phosphorique

Acide Sulfique

Acide citrique

6.3.i. Eaux célèbres

Souvent dans les ouvrages sur le brassage on trouve des tableaux d'eaux « célèbres ». Il s'agit des eaux présentes dans des villes ou régions d'origine d'un style de bière historique. Il faut rester prudent sur ces eaux, car parfois il existe plusieurs eaux dans une même région, certaines ont évolué depuis la date historique de la production du style concerné et parfois le style à évoluer depuis son origine.

Toutefois le côté historique reste important puisque ce sont souvent les eaux présentes qui ont permis de développer un style historique et ainsi de comprendre l'importance de l'eau dans les styles.

Ci-dessous quelques profils d'eau « célèbres » :

À nuancer et développer.

6.3.j. Eau très alcaline

6.4. Conduire l'empâtage

6.4.a. Effets des enzymes et choix optimal des températures

Les enzymes ayant des effets différents et complémentaires, on doit faire des choix pour élaborer le moût. Cela dépendra du style de bière désiré. Les 2 enzymes principaux étant les alpha-amylases et bêta-amylases, ce sont elles qui détermineront l'essentiel des caractéristiques sucrées du moût, qui est un équilibre entre les sucres fermentescibles (alcool) et les sucres non fermentescibles (corps).

- Les **bêta-amylases** (et dextrinases) favorisent les sucres fermentescibles (simples), la prolongation d'un palier à leur température de travail optimale (**60-65 °C**) permettra d'obtenir un moût avec un potentiel d'alcool plus importants (et par conséquent un corps réduit).

- Les **alpha-amylases** favorisent les chaînes plus longues, non totalement fermentescibles. La prolongation d'un palier à leur température de travail optimal (**70-75 °C**) permettra d'obtenir un moût avec un potentiel d'alcool plus faible mais un corps plus élevé.

C'est donc principalement un choix entre l'équilibre de ces 2 facteurs qui donnera les caractéristiques principales du moût et potentiellement de la bière.

Les enzymes principales sont décrites dans le chapitre sur la [biochimie des enzymes](#).

6.4.b. Effet du rapport eau-grains

La quantité d'eau de la solution par rapport à la quantité de grains est le ratio Eau/Grains. Ce ratio a une influence sur la performance globale de la maische. Il faut suffisamment d'eau pour que la gélatinisation de l'amidon se produise et pour que les enzymes puissent se disperser. A contrario une maische un peu épaisse permet une meilleure conservation des enzymes lorsque les températures sont élevées.

- Brassage anglais (épais) : 2,0 à 2,5 L/Kg (une seule cuve qui sert à l'infusion et à la filtration) ;
- Brassage franco-belge (moyen) : de 2,5 à 3,5 L/Kg ;
- Brassage allemand (liquide) : de 3,5 à 5,0 L/Kg (cuve en chauffe directe nécessitant un brassage continu donc une maische plus liquide).

Il est souvent recommandé un ratio de l'ordre de **3,0 à 3,5 L/Kg**.

6.4.c. Protocoles

Il existe plusieurs méthodes d'empâtage suivant les régions et les brasseurs.

On distingue 2 types principaux :

- **Mono-palier** ou isotherme, qui consiste à appliquer une seule température pendant une durée (souvent 60 minutes). Ce protocole est pratique et très efficace sur les malts bien modifiés (SNR > 40 %). Peu être utilisés sans chauffe directe (en infusion) si le contenant est bien hermétique.
- **Multi-paliers**, qui consiste à appliquer une série de paliers (température maintenue constante pendant une durée) défini par des températures croissantes et des durées. Ce protocole permet de mieux affiner la composition de la maische et est utile pour les malts peu modifiés (SNR < 40 %).

Le brasseur dispose donc comme outil principal de l'empâtage le choix des paliers à appliquer à la maische pour obtenir le moût correspondant au style désiré.

À cela s'ajoute différents procédés pour atteindre la température du palier :

- **Chauffe directe**, la cuve est chauffée et brassée pour atteindre la température désirée, nécessite une maische plutôt liquide. La chauffe est actionnée pour maintenir la température souhaitée ou monter au palier suivant.
- **Infusion**, de l'eau chaude est ajoutée pour atteindre la température désirée par équilibre thermique, on peut utiliser une maische épaisse. L'infusion se déroule sans chauffe avec un abaissement lent de la température par perte.
- **Décoction**, un extrait du moût est porté à ébullition, puis reversé dans la maische pour atteindre la température désirée par équilibrage thermique. Cette opération peut être reproduite plusieurs fois à des paliers différents. Ce procédé utilisé en Allemagne notamment, permet de produire des bières très sèches.

Protocoles spéciaux

Saccharification maximale

Les processus enzymatiques se déroulent dans un ordre croissant de température (une température élevée dénaturant une enzyme de manière irréversible). Toutefois certaines techniques avancées font un empâtage par étapes avec retour en arrière. Ainsi on peut laisser refroidir après saccharification (65 à 67 °C) jusqu'à 40 °C, réintroduire du malt frais (et des enzymes donc) et faire un palier de 40 minutes, puis de nouveau un palier de saccharification. Cela permet de faire travailler l'enzyme **maltase** (40 °C) sur les maltoses produits précédemment par les amylases (65 à 70 °C) et ainsi d'améliorer le rendement.

Ceci permet d'optimiser les glucoses pour certaines bières spécifiques nécessitant un taux d'esters important. Ce protocole reprend un peu le principe de la décoction.

Palier simplifié (historique)

De manière globale, pour faire simple et historique il faut rappeler qu'il est possible de réaliser l'empâtage à une seule température, entre 50 et 55 °C, ce qui est un compromis de tous les paliers principaux et optionnels (et de plus estimable à la main, car c'est à partir de là que la sensation de chaleur commence à se transformer en douleur). C'était probablement ce qui était fait historiquement avant l'invention du thermomètre. Avec un tel palier unique on peut obtenir un rendement d'environ 90 % de conversion en le faisant durer environ 3 à 4 heures.

Palier progressif

Il existe un autre protocole historique pour produire les bières d'abbaye forte qui consiste à mettre à tremper les céréales dans l'eau à température ambiante, puis à chauffer très progressivement jusqu'à atteindre 78 °C en 2 heures, soit environ 0,3 °C par minute.

Paliers facultatifs

À côté du ou des paliers principaux de saccharification, il existe d'autres paliers optionnels ou historiques.

Palier de gélification

Certaines céréales crues ont une température de gélification supérieure à celle désirable pour la saccharification de l'amidon. Il faut donc préalable à l'empâtage réaliser une gélification de celle-ci à part, puis les introduire refroidies dans la maische. Pour celles qui ont une température de gélification inférieure au palier de saccharification il est recommandé de faire une pause de 10-15 minutes à ce palier.

Palier de trempage (*dough-in*)

Ce palier permet de tremper les céréales pour mieux exposer l'amidon.

Selon certains brasseurs ce palier ne serait nécessaire qu'avec des céréales crues.

Palier protéinique

Ce palier permet de réduire les protéines en laissant travailler les enzymes [protéases et peptidases](#), qui réduisent les protéines. La réduction des protéines trop longues en protéines plus courtes (peptides ou polypeptides), voir en acides aminés simples permet de réduire le trouble, mais peut aussi réduire la tenue de la mousse si on le prolonge trop.

- La tenue de la mousse exige la présence de protéines de taille moyenne.
- Le trouble de la bière est principalement provoqué par la présence de protéines longues.

Suivant les malts et céréales utilisés ce palier sera alors plus ou moins long... Ce qui est très difficile à déterminer et provoque de longs débats sur les forums amateurs.

Il semble que les malts modernes soient suffisamment modifiés (paramètre SNR) pour que les protéines soient déjà dans une longueur acceptable et que ce palier ne soit pas nécessaire. Toutefois certains malts sont moins bien préparés et l'utilisation de céréales brutes (non maltées) peut rendre ce palier appréciable...

Ce palier doit être réalisé à une température de 45 à 55 °C pendant une durée 15 à 20 minutes suivant le type de céréales utilisés.

- 50 °C favoriserait le découpage fin des protéines, un découpage trop important (malt très modifié et pallier 50 °C) peut conduire à une bière qui aura trop peu de corps et une faible tenue de mousse ;
- 55 °C favoriserait le découpage moyen des protéines et serait appréciable pour les malts clairs européens.

Palier de finition (*mash-out*)

Ce palier a pour objectif de stabiliser la maische afin que plus aucune enzyme ne continue à travailler pendant le filtrage. Pour cela il faut maintenir une température élevée d'environ 78 °C pendant 10

minutes, ce qui inactive la majorité des enzymes. Pas plus, car cela entraîne l'extraction de tanins des écorces de céréales, ce qui introduira une astringence peu désirable.

Il est recommandé pour éviter que les enzymes continuent à travailler (et modifie le goût) pendant la filtration et au début de l'ébullition.

7. Filtrage et rinçage

Le filtrage permet de séparer la maische en 2 parties :

- Drêche, les restes solides des céréales, c'est un déchet du procédé de brassage. Toutefois la drêche contient encore de l'amidon, des sucres et des minéraux. Elle peut être valorisée sous diverses formes :
 - Nourriture pour animaux (poules ou vache en raffole) ;
 - Incorporer à une pâte pour faire des biscuits sucrés ou salés, de la pâte à pain ;
 - Servir de base pour un élevage de champignons ;
 - Incorporer au compost.
- Moût, partie liquide (au goût sucré) qui deviendra la bière

Le filtrage est possible grâce à la présence des restes de téguments des grains (enveloppe). Certaines pratiques anciennes mettent en œuvre des branches de genévrier pour filtrer.

Le filtrage peut être problématique lorsque :

- La maische n'est pas assez chaude (au-dessous de 60 °C la maische devient plus visqueuse),
- L'endosperme des grains a été trop finement broyé (farine),
- La teneur en céréales sans enveloppes est importante (blé, riz) ;
- La teneur en céréales contenant beaucoup des glucanes est importante ;
- Le rapport eau-grains est faible.

Rinçage à développer

8. Cuisson

Référence : [Cuisson \(Univers Bière\)](#)

La cuisson du moût consiste à le porter à ébullition et à le maintenir pendant environ 45 à 90 minutes. La cuisson (ébullition du moût) a plusieurs objectifs ou effets :

- Stériliser le moût,
- Inactiver les enzymes qui seraient encore intacts (pour stabiliser le moût),
- Isomériser les houblons (incorporation de l'amertume),
- Dénaturer et coaguler les protéines,
- Création des composés aromatiques et de goûts,
- Augmentation de couleur ([réaction de Maillard](#)), caramélisation des sucres et oxydation des polyphénols)
- Évaporation des composés volatils indésirables (**DMS**, dimethyl sulphide)
- Concentration du moût (évaporation)

La température pour atteindre l'ébullition dépend de la pression atmosphérique et est donc très lié à l'altitude. Au niveau de la mer, la température d'ébullition est de 100 °C.

Plus de détails sur la thermodynamique de l'ébullition : Ébullition

8.1. Aromatisation du moût

Référence : [Hops : Anatomy & Chemistry 101](#)

C'est durant la cuisson que le moût est aromatisé notamment avec les houblons ([wikipédia](#)) et autres aromates ou épices de la recette. Depuis le milieu du Moyen Âge c'est le houblon qui est devenu l'aromate très largement majoritaire, voir exclusif. Notamment grâce à ses propriétés à la fois amérisantes, antiseptiques et aromatisantes. Préalablement c'était un mélange de plantes qui étaient utilisés et souvent appelés « Gruit » dans certaines régions ; voir chapitre Petite histoire des aromates et le document annexe « **Aromates de brassage** ».

8.1.a. Houblons

Le houblon (*humulus lupulus*) est une plante herbacée vivace grimpante de la famille des Cannabacées et parfois nommé « Vigne du Nord », « Salsepareille indigène », « bois du diable »... C'est une liane à grosse racine charnue de laquelle partent de longues tiges à section quadrangulaire qui s'enroulent rapidement autour de leur support. Ce sont des plantes dioïques, chaque plant est mâle ou femelle). Les plants femelles produisent des chatons qui à floraison deviennent des cônes ovoïdes ouverts et globuleux et gris. Les plants mâles portent des fleurs en panicules larges.

Le houblon est génétiquement et historiquement proche du Chanvre.

Plus détails dans le chapitre : Petite histoire des aromates

8.1.b. Composés du houblon

Pour le brassage ce que l'on utilise c'est les chatons (plant femelle) non fécondés.

Ces chatons de houblons contiennent plusieurs composés, dont l'expression varie dans le temps. De manière simplifiée on a :

- Composés d'amertume dont l'expression passe principalement par une résine la **lupuline** ;
- **huiles essentielles** qui sont des composés de saveurs et d'arômes.

Les huiles essentielles étant très volatiles, elles s'évaporent rapidement du moût en ébullition. C'est pourquoi les saveurs et arômes du houblon ne seront présents dans la bière que s'ils sont introduits vers la fin de l'ébullition. Les saveurs amères s'expriment au travers de résines qui par contre se solubilisent dans le moût et résistent très bien à l'ébullition.

C'est une plante tonique stomachique à essence sédatrice avec un pouvoir œstrogénique. La propriété médicinale des chatons sont : sédatif léger, facilitateur de la digestion, fébrifuge et régulateur du système pileux.

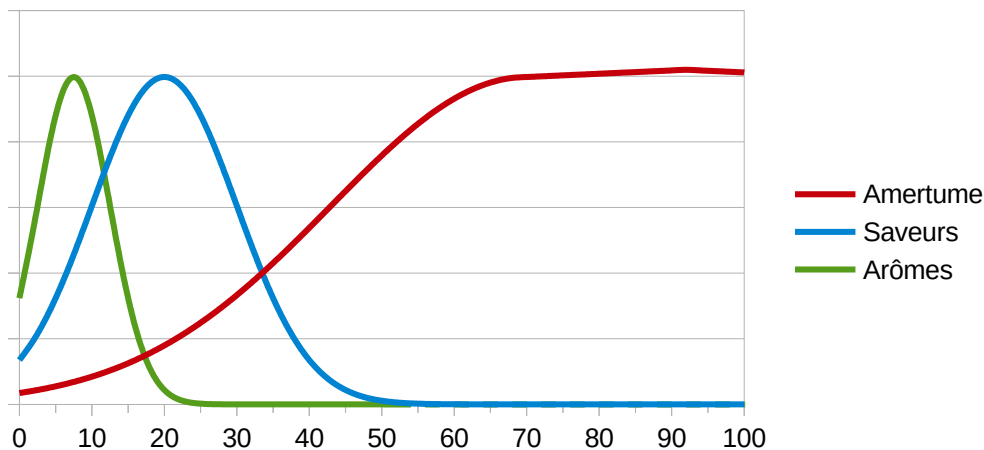


Figure 7: Expression des houblons suivant le temps de cuisson (minutes)

8.1.c. Amertume

L'acteur majeur de l'amertume des fleurs de houblons c'est la lupuline ([wikipédia](#)), une poudre jaune présente dans la fleur mure, et qui contient principalement 2 acides :

- Humulone ([wikipédia](#)) ($C_{21}H_{30}O_5$, acide alpha) : produit à partir de la lupuline pendant l'ébullition et qui se transforme en iso-humulones qui sont des anti-bactériens à saveur amère, et qui participe à la stabilité de la bière et de la mousse, principalement :
 - cis-isohumulone
 - trans-isohumulone
- Lupulone (acide beta) : qui est un anti-bactérien et un anti-oxydant qui a peu d'effet direct sur l'amertume, car il se solubilise mal ; on peut toutefois l'extraire mieux par le procédé d'infusion à froid (*Dry Hoping*)

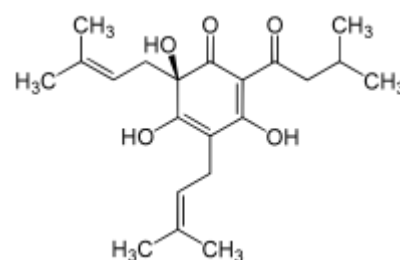


Figure 8: Humulone

Plus la durée d'ébullition est grande, plus les acides alpha vont s'isomériser pour se transformer en iso-humulone qui est très soluble. L'amertume s'exprime au fur et à mesure de l'ébullition et nécessite de 30 à 60 minutes pour être totalement présente ; au-delà l'amertume aura tendance à se décomposer.

Dans le temps l'iso-humulone peut se transformer en saveurs indésirables, notamment lorsque la bière est exposée à la lumière naturelle (il y a alors une réaction avec la vitamine B2). C'est pourquoi il faut conserver la bière à l'abri de la lumière, de préférence dans un contenant sombre.

8.1.d. Protection bactérienne

Source : [Lars Garshol blog](#)

Les acides alpha (humulone, adhumulone et cohumulone) ont aussi des propriétés anti-septiques, notamment en empêchant les bactéries de se nourrir et donc de se reproduire. Une fois isomérisés par l'ébullition, ils peuvent entrer en contact avec les bactéries et levures présents dans le moût. Les organismes gram-positif ne peuvent repousser les alpha isomérisés. Lorsque les bactéries gram-positives pompent leurs nutriments via leur membrane, elles absorbent donc des isomères alpha. Le pH important dans la bactérie va découper ces alphas, qui vont alors capturer des ions libres (Mg^{2+}). Cette combinaison sort ensuite de la bactérie laissant derrière des ions H^+ libres. Cette augmentation de la concentration H^+ dans la cellule va réduire puis bloquer le fonctionnement des pompes de la bactérie et ainsi les empêcher de se reproduire.

8.1.e. Flaveurs

Le houblon contient aussi de très nombreuses huiles essentielles, pour beaucoup de la famille des terpènes, qui apportent chacune des flaveurs particulières. On trouve notamment : Myrcène, Humulène, Caryophyllène, Farnésène, Géraniol, Linatiol...

Les huiles essentielles sont très volatiles et s'évaporent vite si on prolonge l'ébullition ; elles sont apportées par les houblons de finition qui sont ajoutés quelques minutes afin la fin de l'ébullition.

On classe, généralement, les flaveurs du houblon en 5 catégories gustatives :

- Épicée (spicy),
- Mentholée (grassy),
- Résinée (piney),
- Florale (earthy) et
- Citrique (citrus).

Plus de détails sur les saveurs : Saveurs (goût & arômes) : saveurs, arômes et sensations trigéminales et

8.2. Cassure à chaud (Hot Break)

Lors de la montée en température les protéines vont s'agglomérer aux polyphénols formant des sortes de nuages ou flocons qui pourront être filtrés. Dans le moût ces agglomérats apparaissent sous forme de granules puis des sortes de nuages qui circulent dans le moût avec les courants de convections.

Les polyphénols proviennent, surtout, de l'écorce des grains de céréales et du houblon.

Les protéines sont principalement issues des céréales.

Cette cassure (séparation et agglomération) est souvent considérée comme indésirable, sa filtration permet d'obtenir une bière plus limpide et d'améliorer la conservation ; ce sont toutefois des considérations relativement modernes et la conservation des cassures ne va pas dénaturer la bière fraîche.

Ces composés seront, peu ou prou, à nouveau agglomérés lors du refroidissement (s'il est rapide), c'est la cassure à froid (voir chapitre suivant).

9. Refroidissement

Le refroidissement est essentiellement un phénomène thermodynamique inverse du précédent (cuisson) qui consiste à refroidir le moût afin de le ramener à la température d'ensemencement des levures. S'y produisent les phénomènes d'évaporation, de dilatation et contraction similaires. Toutefois un aspect important du refroidissement pendant le brassage est sa vitesse.

9.1. Méthodes de refroidissement

L'objectif est donc de refroidir vite et bien (sans contamination).

Pour cela il existe plusieurs méthodes, toutes mettant en œuvre les principes de la thermodynamique.

Le refroidissement consiste à ramener le moût bouillant (100 °C) à la température d'ensemencement de la levure (de 20 à 25 °C selon les souches). Le refroidissement peut se dérouler de plusieurs manières.

9.1.a. Refroidissement naturel

Le brasseur laisse le moût refroidir et attend simplement que la température atteigne l'objectif.

C'est long et d'autant plus long que le brassin a un volume important. La longueur du procédé engendre des risques de faux goûts par oxydation ou par contamination par un agent bactérien.

Pour optimiser la durée, il faut favoriser les échanges thermiques :

- On conservera le moût dans sa **marmite inox** avec couvercle, cela évite de le transvaser chaud et de l'exposer à la contamination, de plus la marmite inox est un meilleur conducteur de chaleur qu'un fût en plastique (plutôt isolant) ; l'idéal serait une marmite en cuivre mais c'est très fortement déconseillé car aux températures de cuisson le cuivre va migrer dans le moût et rendra la bière impropre à la consommation ;
- On aura sélectionné une marmite dont le **rapport volume/surface** est favorable à la surface afin de maximiser les surfaces d'échange, ce qui signifie une marmite plus large que haute, c'est pas courant ;
- On posera cette marmite sur une **surface qui conduit bien la chaleur**, par exemple le carrelage du sol (conducteur) est mieux que la table en bois (isolant) ;
- On **brassera le milieu ambiant** pour utiliser la convection au mieux (ventilateur, courant d'air) ;
- On déposera la marmite dans un **milieu le plus frais et le plus conducteur possible** (et propre).
L'air est un mauvais conducteur, l'eau conduit bien mieux la chaleur.
 - Dans une grande bassine d'eau on peut utiliser de la glace et un grand volume d'eau afin d'avoir une réserve de « froid » ; cela réduit les avantages écologiques de cette méthode ; sauf à disposer d'un torrent ou d'une source accessible ;
 - On peut aussi entourer la marmite d'un linge humide (l'eau est meilleur conducteur que l'air), l'évaporation de l'humidité du linge va pomper pas mal d'énergie thermique.

On peut légèrement optimiser en ne mettant pas le couvercle au début et en brassant jusqu'à la température de 80 °C ; ensuite le risque de contamination apparaît et il faut ensuite laisser faire l'équilibre thermique (couvercle fermé).

Durée (20 litres)	De 8 à 12 heures à l'air dans une pièce à 20 °C Plus court dehors l'hiver.
Avantages	Aucun matériel, pas de perte d'eau
Inconvénients	Long, possibilité de faux goût

9.1.b. Serpentin

Le principe du serpentin est de plonger dans la marmite un tuyau le plus long possible (pour maximiser les surfaces d'échange), d'une matière bien conductrice et d'y faire circuler un liquide froid afin de « pomper » la chaleur du moût le plus vite possible. Il faut aussi brasser le moût pour améliorer l'efficacité.

La source d'eau froide peut être de 2 ordres :

- L'eau du robinet que l'on fera circuler ;
- Une réserve statique d'eau (grande baignoire d'eau glacée, etc.).

L'eau évacuée sera réchauffée par le moût et pourra :

- Finir à l'évier (perte) ;
- Être transvasée dans un grand récipient pour servir d'eau de lavage.

La matière du serpentín sera :

- Cuivre, très bon conducteur thermique, mais peut réagir chimiquement avec l'acidité du moût ;
- Inox, totalement inerte mais conducteur thermique moyen.

Durée (20 litres)	De 10 à 20 minutes
Avantages	Rapide
Inconvénients	Consomme beaucoup d'eau, nécessite un nettoyage supplémentaire, risque de contamination par le brassage, risque de contamination par le cuivre.

9.1.c. Échangeur à plaque

Il s'agit d'un système type professionnel qui fait circuler le moût chaud et de l'eau froide à sens inverse dans un système de plaque (inox) optimisant les surfaces d'échange. Tellement efficace qu'un brassage est généralement inutile. Toutefois c'est un système complexe à mettre en œuvre et qui n'est intéressant que pour des volumes importants.

Durée (20 litres)	Quelques instants
Avantages	Très rapide
Inconvénients	Nécessite un matériel important (échangeur, pompes, tuyaux) et un nettoyage supplémentaire.

9.2. Cassure à froid (cold break)

Un refroidissement rapide permet de coaguler les protéines qui précipitent, réduisant la formation de DMS et de réduire l'oxydation du moût ainsi que les risques de contamination.

Lors du refroidissement le moût doit rester stérile et ne pas être contaminé par des levures sauvages ou des bactéries.

Cet agglomérat peut être laissé de côté grâce à un tourbillon (voir paragraphe suivant) avant de siphonner.

9.3. Tourbillonner (whirlpool)

Référence : [Whirlpool \(wiki brassageamateur.com\)](http://wiki.brassageamateur.com/Whirlpool)

La méthode du tourbillon a pour objectif de concentrer au fond et au centre de la cuve les résidus solides afin de pouvoir éviter de les transférer. Le tourbillon est un phénomène physique provoqué dans le moût par une rotation rapide du liquide et mettant en œuvre la force centrifuge, les frottements et les gradients de pression dans le liquide.

9.3.a. Utilisation

Cette force centrifuge est utilisée lors de brassage à plusieurs étapes :

- Décantation de carbonates précipitée lors du pré-traitement de l'eau, après ébullition un tourbillon et un repos de plusieurs heures (pendant le refroidissement) va concentrer au centre et au fond un amalgame de craie, ce sont les carbonates précipités.
- Préparation au soutirage sur le moût refroidi, ce tourbillon va concentrer les cassures à chaud, les cassures à froid et les restes de houblons au centre permettant un soutirage en les laissant derrière

La procédure est d'entraîner en rotation rapide la solution avec une grande cuillère, puis de retirer la cuillère pour laisser la rotation se poursuivre et se ralentir. Laisser reposer environ 20 à 30 minutes. On constate alors qu'un agglomérat solide s'est formé au centre sous forme de cône.

On pourra alors soutirer, via un larron (voir [paragraphe dédié plus bas](#)), en n'aspirant pas cette zone. Ce qui permet une sorte de filtrage.

9.3.b. Principe mécanique

La rotation rapide crée une force centrifuge qui propulse les éléments (liquide et non liquide) vers l'extérieur et donc sur les parois du contenant.

- Ce qui crée une différence de pression entre le centre et les zones proches des parois ;
- La rotation entraîne aussi des frottements entre la solution et les parois de la cuve, notamment au fond ou la zone de contact est plus importante, ce qui réduit la vitesse de rotation à ces endroits ;
- Cet ensemble de phénomènes entraîne des variations de pression dans la solution ;
- Comme dans tout liquide (ou gaz) les pressions tendent à s'équilibrer ce qui entraîne des mouvements des zones de fortes pressions (près des parois) depuis les zones de plus faibles pressions (le centre et vers le bas) ;
- Le ralentissement progressif de la rotation et de ces phénomènes va finir par amalgamer au centre les éléments les plus lourds (solides) et créer ainsi un amas.

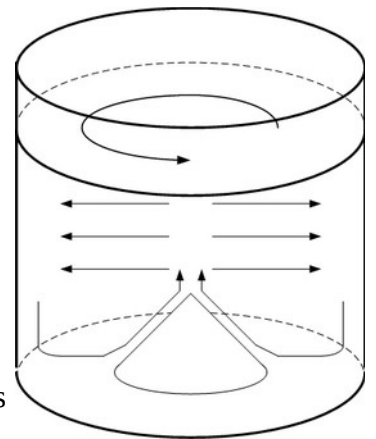


Figure 9 : Principe mécanique du tourbillon

10. Fermentation

Voir à fusionner avec le chapitre Biologie/Levure ?

Références :

- [La biochimie des levures \(wiki brassageamateur.com\)](http://wiki.brassageamateur.com)
- [Fermentation \(univers-biere.net\)](http://univers-biere.net)

Une fois refroidit le moût va être ensemencé avec les levures prévues par la recette afin de pouvoir débiter la phase de fermentation. Cette phase doit se réaliser dans un milieu propre et équilibré afin d'éviter des contaminations avec des levures sauvages ou bactéries non désirées et de proposer un environnement favorable aux levures.

Il s'agit d'un processus biochimique par lequel des sucres (glucides, principalement le glucose et maltose) seront transformés en alcool (éthanol) et gaz carbonique dans un milieu liquide, pauvre en oxygène (anaérobie).

Voir plus de détails dans le chapitre dédié Introduction à la biologie et biochimie des levures

10.1. Famille de levure

Les levures sont des champignons, pour le brassage on utilise principalement 2 familles :

- [Saccharomyce Cerevisiae](#), fermentation dite haute (Ale)
- [Saccharomyce Pastorianus](#), fermentation dite basse (Lager)

Certaines bières dites à fermentation spontanée utilise [Dekkera bruxellensis](#) ou même des bactéries dites « sauvages ».

La levure traditionnelle a fermentation haute (*Saccharomyce Cerevisiae*) est la même que la levure dite « de boulanger » pour la panification. Ce qui la différencie ce sont les souches utilisées qui sont issus de longue sélection au cours des âges. Les levures de boulanger étant choisis plus pour leur production propre et intense en CO₂, alors que les levures de bière sont plutôt sélectionnées pour leurs productions alcooliques, leur résistance à l'alcool, leur production de composés annexes...

10.2. Biochimie des levures

Les levures sont des êtres vivants, pour vivre en bonne santé elles ont besoins de nutriments, principalement :

- Sucres simples (voir le chapitre dédié aux [Glucides](#)), base de leur énergie ;
- Amino-acides (FAN), qui serviront de base aux levures pour construire les enzymes nécessaires à leurs métabolismes ;
- Vitamines ;
- Sels minéraux.

On trouve de manière naturelle ces éléments dans un moût classique, toutefois un moût trop artificiel (sucre de table ajoutés par exemple) peu devenir déséquilibré. Les glucides ne suffisent pas.

10.2.a. Énergie

Les levures, comme toutes cellules vivantes utilisent largement le couple ATP/ADP pour produire l'énergie nécessaire à leurs métabolismes.

ATP (Adénosine triphosphate)

[Wikipédia](#)

En biochimie l'ATP fournit l'énergie nécessaire aux réactions chimiques du métabolisme, de la locomotion, à la division cellulaire.

Pour fournir cette énergie, l'ATP est clivée par hydrolyse en ADP et en Phosphate ; ce qui produit 7,3 kcal/mol.

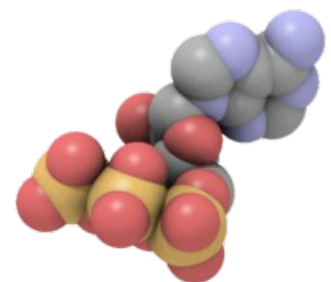


Figure 10: Molécule d'ADP /
source : Wikipédia

ADP (Adénosine diphosphate)

[wikipédia](#)

En biochimie l'ADP est le résultat du clivage de l'ATP pour créer de l'énergie. L'ADP est recyclée en ATP par les processus biochimiques de respiration cellulaire, photosynthèse, glycolyse ou cycle de Krebs.

10.3. Processus biochimique principal

Les levures ont 2 métabolismes principaux pour créer l'énergie nécessaire à leur survie : la respiration (en milieu aérobie, pourvu l'oxygène) et la fermentation (anaérobie, milieu dépourvu d'oxygène). Dans le moût s'est essentiellement le second qui nous intéresse et qui permet de créer de l'alcool et du gaz carbonique à partir des sucres présents. Les levures sélectionnées pour le brassage ont tendance à favoriser la fermentation malgré son rendement plus faible lorsqu'il y a suffisamment de sucres disponibles, ce qui est le cas dans le moût.

L'oxygène est toutefois consommé pour créer des stérols qui permettent aux levures de grossir, se développer et se reproduire. C'est souvent le cas lors des premières étapes de fermentation.

La levure *Saccharomyces cerevisiae* va développer son activité en 3 étapes successives avec plus ou moins de recouvrement :

- **Adaptation** (*lagtime*) : 0 à 24 h ; Les levures utilisent leur propre glycogène comme stock de nourriture et s'adaptent à leur environnement (création des enzymes à partir des acides-aminés et construction de stérols à partir d'oxygène pour rendre leur membrane perméable) ;
- **Atténuation** (*primary*) : 3 à 7 jours. Fermentation alcoolique du glucose (anaérobie). Elles vont consommer les sucres simples présents pour les convertir en éthanol et CO₂. À ce stade se produit une mousse et d'importants résidus (Krausen) très amer qui adhère aux parois.
- **Maturation** (*conditionning, secondary*) : 2 à 3 semaines. Cette étape commence en même temps que l'atténuation mais dure bien plus longtemps et se produit à un rythme plus lent. Les levures (non endormie) convertissent des sucres plus complexes et aussi des produits non désirés créés par l'étape rapide d'atténuation. Les levures dormantes (sédimenté au fond) vont produire des déchets dont le goût n'est pas désirable : c'est pourquoi il est recommandé de transvaser le moût dans un autre contenant (sans oxygénation) avant mise en bouteille. À la fin du processus les levures sédimentent ainsi que les protéines les plus lourdes. Les bières à densité initiale élevée nécessitent une durée plus longue.

Activité des levures (jours)

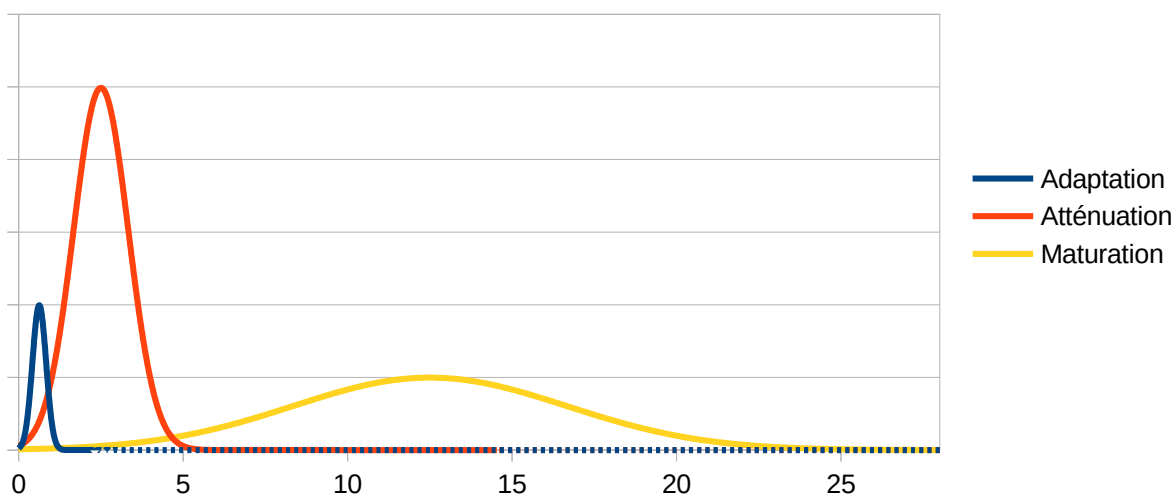
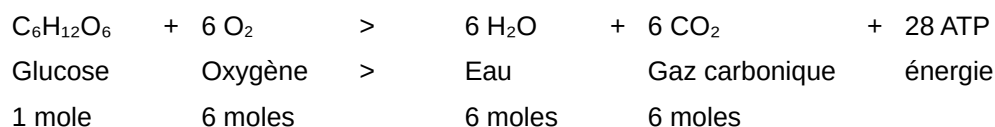


Figure 11: Activité des levures (jours)

10.3.a. Respiration aérobie

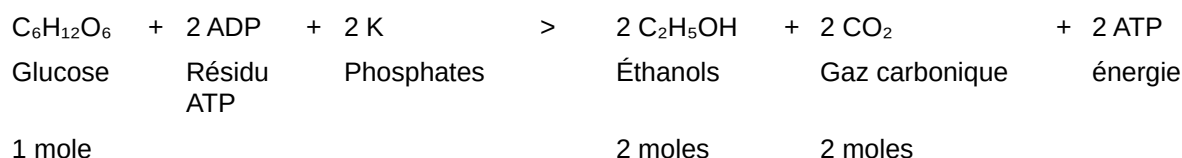
Ce métabolisme n'est presque jamais mis en œuvre par les levures lors du brassage, car le milieu (moût) est très largement pourvu en glucose. L'oxygène est plutôt utilisé par les levures à la construction des membranes cellulaires.

La levure consomme alors de l'oxygène (O₂) pour transformer les glucoses en énergie, eau (H₂O) et gaz carbonique (CO₂) comme résidu.



10.3.b. Fermentation alcoolique (anaérobie)

Équation principale globale :



Cette phase, la plus importante dans le cadre de du brassage, se décompose en 3 étapes qui se déroulent en parallèle :

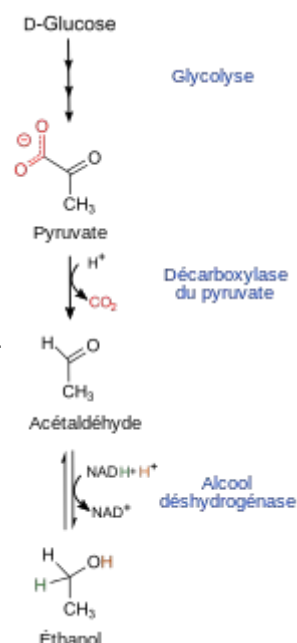
1. **Glycolyse** ([wikipédia](#)) ou la voie d'*Embden-Meyerhof-Parnas*, qui transforme une molécule de Glucose en 2 molécules de Pyruvate ([wikipédia](#)) en consommant une molécule d'eau.
2. **Décarboxylase du pyruvate** ([wikipédia](#)), l'enzyme décarboxylase détache une molécule de CO₂ de chaque pyruvate avec l'aide de l'enzyme thiamine pyrophosphate et de 2 ions magnésiums ; ce qui produit de l'acétaldéhyde ([wikipédia](#)) qui est toxique.
3. **Réduction** de l'acétaldéhyde en éthanol par l'enzyme de catalyse alcool-déshydrogénase ([wikipédia](#)) par polarisation du groupe carbonyle.

Le processus nécessite donc :

- Des matières premières :
 - des glucides, principalement du glucose ;
 - des ADP (résidu des ATP) ;
 - des Phosphates ;
- Des agents intermédiaires qui sont fabriqués à partir des acides aminés :
 - enzyme décarboxylase,
 - enzyme déshydrogénase et
 - cofacteur pyrophosphate de thiamine

Et produits :

- de l'éthanol (alcool)
- du gaz carbonique (rendra la bière pétillante)
- de l'énergie sous forme d'ATP (qui chauffe le moût)
- et des composés annexes, produit par d'autres voies (décomposition d'acides aminés par exemple) :
 - Alcools de fusel : isobutanol, alcool amylique, hexanols...
 - Méthanol, toxique car se transformant en formol dans le corps
 - Alcools aromatiques
 - Esters
 - Aldéhydes
 - Acides organiques
 - Composés sulfurés



10.3.c. Processus annexes

En fonction du milieu, de la souche de levure et des enzymes présentes, il peut y avoir glycolyse d'autres sucres simples :

- fructoses,

- galactoses,
- lactoses,
- maltoses.

Par exemple la levure sèche BE-256 digère les maltotrioses (3 glucoses), pas la levure T-58.

10.3.d. Conditions de fermentation

La fermentation alcoolique se déroule dans les conditions suivantes :

- Température (selon la souche de levure) :
 - Inférieure à 10° C le processus est très ralenti voir incomplet ;
 - Supérieure à 45° C les levures meurent, la capacité des levures diminuent au fur et à mesure que le taux d'alcool augmente. Le plus souvent la température de 32 °C est considéré comme un maximum en fermentation à partir duquel les levures ont un comportement erratique et produit de plus en plus de composés annexes ;
- Oxygène : bien que le processus soit anaérobie les levures ont besoin d'un peu d'oxygène pour leur survie et leur protection contre l'alcool (via les stérols) ;
- Azote assimilable : nécessaire à la reproduction des levures (synthèse de protéines) ; une carence conduit à la production de composés soufrés et un ralentissement de la fermentation ; qui peut alors laisser la place à des bactéries indésirables ;
- Alcool : c'est un antiseptique même pour les levures qui finissent empoisonnée à partir de concentration de 16 % (variable suivant les souches).

10.3.e. Taux d'alcool (TAV ou ABV)

Le taux d'alcool se mesure généralement en pourcentage de volume (TAV, ABV ou %/vol) et parfois en pourcentage de masse (TAP, ABW ou %/weight). Ce taux mesure essentiellement la concentration en éthanol. Les bières ont des taux qui s'échelonnent généralement de 4 à 10 %/vol.

La bière (verte ou finale) est un mélange d'eau, d'éthanol et de divers composés annexes.

Voir plus de détails sur le [TAV](#) dans le chapitre sur les unités de mesure.

10.3.f. Sédimentation

Floculation

https://www.azprocede.fr/Cours_GC/decantation_introduction.html

11. Mise en bouteille

Larron, transvasement, siphon,
Volumes

Souvent la bonne pratique est de siphonner la cuve de fermentation dans une autre cuve (propre et stérile) en évitant de transvaser le fond de cuve. Ce fond de cuve peut représenter 1 à 2 cm suivant la cuve et occasionne une perte de plusieurs litres, on appelle ce fond le « trumb », ce sont essentiellement des levures mortes ou en dormance, et des résidus d'aromates et des agglomérats de protéines.

Dans un second temps on pratique l'amorçage (ajout du sucre de refermentation) dilué dans un peu d'eau stérile. On brasse l'ensemble dans la cuve de transvasement et on forme un tourbillon afin de concentrer les résidus au centre et au fond de la cuve, sur principe vu au chapitre 9.3.

C'est en suite que l'on transvase le contenu dans les bouteilles. En amateur on utilise un siphon pour cela.

11.1. Siphon (ou larron)

Un siphon est un tuyau servant à transvaser un liquide selon le principe des vases communicants.

Très utile en brassage amateur, permet de facilement transférer de l'eau, le moût ou la bière verte d'un contenant à un autre sans faire de remous, ni absorber de l'oxygène.

Le principe des vases communicant établi qu'un liquide homogène remplissant plusieurs récipients, reliés entre eux et soumis à la même pression atmosphérique, s'équilibre à la même hauteur dans chacun d'eux.

Ce principe permet de transformer un tuyau en un siphon en le plongeant dans 2 récipients et en l'amorçant.

On plonge un tuyau dans un premier contenant rempli d'un liquide, l'autre extrémité doit être plus bas dans un autre récipient. Il faut amorcer en siphonnant (remplir le tuyau du liquide, en aspirant) ; à partir de ce moment-là le liquide va se transvaser, sans autre effort, du point le plus haut jusqu'au point le plus bas en continu jusqu'à atteindre l'égalisation des niveaux.

Si le contenant contient déjà du liquide la hauteur qui compte c'est celle du liquide à partir du moment où l'extrémité est plongé dedans.

La vitesse de sortie du liquide est $v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$ ou h est la hauteur entre les 2 niveaux de liquide ou des extrémités du tuyau.

Selon le principe de la colonne d'eau (Torrelli) la hauteur max d'écoulement est d'environ 10,34 m.

Lors du brassage le siphon est très utile pour transvaser les liquides et permet de limiter l'introduction d'oxygène dans le moût. On l'utilise notamment pour transvaser de l'eau, le moût refroidit dans la cuve de fermentation, transférer le moût en secondaire ou dans la cuve d'embouteillage et parfois même pour l'embouteillage.

Les larrons sont le plus souvent en plastique et sont donc impropre a transvaser un liquide trop chaud.

12. Mûrissement

Référence : [univers-biere.net \(murissement\)](http://univers-biere.net/murissement)

12.1. Re-fermentation en bouteille

Les bières artisanales sont re-fermentées en bouteille, c'est-à-dire, qu'une petite quantité de sucre est ajouté juste avant l'embouteillage, afin que les levures, encore en activité, puissent travailler dans la bouteille. Ceci permet d'augmenter un peu le taux d'alcool, mais surtout de créer du gaz carbonique qui va venir saturer la bière. C'est ce CO₂ qui va donner sa pétillance spécifique à la bière.

La concentration en CO₂ va dépendre de plusieurs facteurs, notamment la température, plus celle-ci est faible plus le CO₂ peut se dissoudre dans l'eau mais aussi et surtout la quantité de sucre ajouté.

12.1.a. Dissolution du CO₂

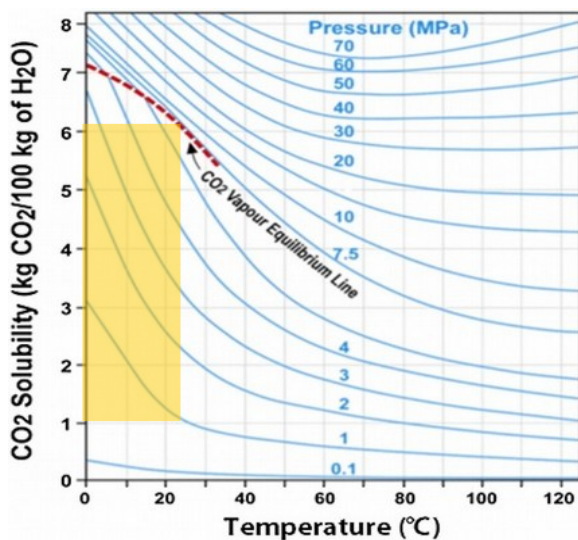


Figure 13: Dissolution du CO₂ selon la température

baisse des températures et aussi avec l'augmentation de la pression.

12.1.b. Carbonatation

Unité : volume/volume (v/v) ou g/L

On mesure souvent la carbonatation en « volume de CO₂ » (litres de CO₂ dissout dans 1 litre de bière) à 20 °C (mesure sans unité parfois notée v/v en référence à volume/volume). Ce volume correspond au volume qu'occuperait le CO₂ s'il était totalement extrait de 1 litre de bière et mis en condition gazeuse normale (0 °C et 1 atm). On mesure aussi cette carbonatation en g/L (grammes de CO₂ par litre de bière). Ce phénomène est régi par la loi de Henry « A température constante, la quantité de gaz dissout dans un liquide est proportionnelle à la pression partielle qu'exerce ce gaz sur le liquide ».

Cette loi englobe d'autres lois et se base sur la [loi des gaz parfaits](#).

Lors de la fermentation principale, beaucoup de CO₂ vont être créés, la majeure partie va s'échapper et une autre partie va rester dans le moût (par dissolution). À température standard de 20 °C on a une carbonatation d'environ 0,861 v/v, soit 1,6 g/L. C'est justement la loi de Henry qui définit cette solubilité. Attention quand on parle de solubilité (ici CO₂ dans l'eau) il faut qu'il y ait saturation de CO₂. Dans le cadre de la fermentation c'est bien le cas, il y a création de plus de CO₂ dans le moût que ce que le moût peut contenir.

Ensuite au fur et à mesure de la re-fermentation en bouteille, le gaz va au début légèrement se dissoudre et aussi s'échapper dans le volume de tête (espace libre de la bouteille). La pression va augmenter dans ce



Figure 12: Vocabulaire d'une bouteille

Le CO₂ se dissout facilement dans l'eau.

Il se lie à une molécule d'eau pour former de l'acide carbonique (H₂CO₃), ce qui donne une saveur acide à la solution et participe au goût. Cette transformation se produit jusqu'à un équilibre. Lors de la re-fermentation en bouteille, dans un contenant hermétique (bouteille), l'atmosphère au-dessus du liquide (espace de tête) va se saturer en CO₂.

Ci-contre le diagramme de dissolution du CO₂ (g/L) selon la pression (MPa). Surligné en jaune la zone qui nous intéresse dans le monde du brassage.

On constate que la dissolution du CO₂ augmente avec la

volume de tête et ainsi permettre à plus de gaz de se dissoudre. Et ceci de manière continue jusqu'à la fin de re-fermentation (plus de sucres disponibles ou plus de levures actives) et l'équilibre des pressions. C'est pourquoi la re-fermentation doit être bien maîtrisée par le brasseur amateur afin de ne pas trop saturer la bière (pour respecter le style mais aussi pour ne pas faire exploser la bouteille).

Une bonne bouteille de bière doit pouvoir résister à une pression interne de 10 à 40 bars.

Pour maîtriser la re-fermentation, le brasseur amateur doit s'assurer :

- que la fermentation principale est bien terminée,
- que la quantité de sucre ajoutée est bien celle requise.

C'est aussi ce principe de Henry qui explique la pétillance de la bière à l'ouverture de la bouteille. D'un seul coup la pression de tête est réduite à la pression atmosphérique normale et le gaz dissout doit s'échapper de la bière. Voir le paragraphe [pétillance](#) plus bas.

Une bière avec 5,4 g/l de CO₂ à une pression interne d'environ 2,2 bars.

Pressurisation des boissons gazeuses

Les boissons gazeuses sont maintenues sous une pression importante de dioxyde de carbone (CO₂). On suppose qu'il n'y a que du CO₂ dans le gaz, la pression partielle vaut alors la pression totale : $P_M = P$. Cette pression permet de dissoudre une grande quantité de gaz dans le liquide.

En ouvrant la bouteille la pression dans celle-ci chute brusquement, pour s'équilibrer avec la pression atmosphérique. En vertu de la loi de Henry, $P_m = x_m^l \cdot k_{H,m,s}$, si P_M diminue, puisque $k_{H,m,s}$ est quasi constante, alors x_m^l ne peut que diminuer : la solubilité du dioxyde de carbone chute. En conséquence, le CO₂ dissout se désorbe en partie, en formant des bulles dans le liquide qui s'échappe alors.

Voir chapitre « [Pétillance](#) »

12.1.c. Formation du CO₂

Pour qu'il y ait dissolution du CO₂ il faut au préalable du CO₂. C'est la poursuite de la fermentation (grâce à l'ajout de sucre) qui va le permettre. Cette formation de CO₂ est très difficile à maîtriser, car elle dépend du sucre résiduel (ou ajouté) mais aussi de l'état des levures (à moitié en dormance). C'est cette difficulté qui fait que les industriels simplifient leur tâche en éliminant les levures (filtrage haute finesse) et en ajoutant précisément le volume de CO₂ désirée lors de l'embouteillage.

En artisanal (re-fermentation en bouteille) il faut être plus souple et accepter quelques dérives. L'objectif est d'atteindre une carbonatation optimale un peu en aveugle. Car dans le cas idéal il faut que la fermentation soit totalement achevée, que les levures ne soit pas trop en dormance et que l'on maîtrise la température et l'espace de tête.

Si la fermentation a été longue (plus de 8 semaines) il faut parfois ajouter un peu de levure de re-fermentation pour activer ce processus.

Si la fermentation n'est pas terminée, cela va engendrer plus de CO₂ que prévu il y aura sur-carbonatation.

Des contaminations (autres levures, bactéries...) peuvent aussi produire une sur-carbonatation.

Manipulation des unités de carbonatation

Dans le cadre de la gestion de la carbonatation il faut faire attention aux unités.

Traditionnellement la carbonatation se mesure en « volume de CO₂ » qui correspond au volume qu'occuperait le CO₂ gazeux en milieu standard (273,15 K ou 0 °C et 101 725 Pa ou 1 atm) rapporté au volume de la solution (m³). C'est une valeur sans unité, souvent noté v/v (volume/volume)

On peut aussi l'exprimer dans une unité plus pratique, le g/L (grammes par litre). On passe de l'un à l'autre en utilisant la densité qui provient de la [valeur molaire normale des gaz parfaits](#) et la masse molaire du CO₂ :

$$c_g = \rho \cdot c_{vv} \quad , \quad \text{avec : } \rho = \frac{M_{CO_2}}{V_M} \quad \text{on obtient alors } c_g = \frac{M_{CO_2}}{V_M} \cdot c_{vv}$$

- c_g = carbonatation (g/L)
- c_{vv} = carbonatation (v/v)
- ρ = densité du CO_2 (g/L) aux conditions de pression et température ambiante
 - On peut calculer la densité par : $\rho = \frac{M_{\text{CO}_2}}{V_M}$ avec :
 - M_{CO_2} : masse molaire du CO_2 (g/mole) = **44,0095 g/mol**
 - V_M : Valeur molaire (m^3/mol , mais plus souvent exprimé en L/mol) ; issue de la loi des gaz parfaits :
 - Loi des gaz parfaits : $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$, avec :
 - P : pression (Pa)
 - V : volume (m^3)
 - n : nombre de moles (mole)
 - R : constante universelle des gaz parfaits = $8,3144621 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$
 - T : température (Kelvin)
 - ce qui permet d'obtenir : $\frac{V}{n} = \frac{R \cdot T}{P}$ en m^3/mol , soit la formule : $V_M = \frac{R \cdot T}{P}$
 - Soit la formule complète de la densité : $\rho = \frac{M_{\text{CO}_2} \cdot P}{R \cdot T}$
 - Soit pour une pression standard (1 atm = 101 325 Pa et T=20 °C) : $\rho_{\text{CO}_2} = \mathbf{1,82953 \text{ g/L}}$

Soit au final une conversion comme suit : $c_g = 1,82953 \cdot c_{vv}$

Amorçage (priming)

L'amorçage (priming en anglais) c'est l'action d'ajouter du sucre blanc juste avant l'embouteillage. C'est donc l'amorçage de la refermentation.

Ce sucre ajouté va être partiellement transformé par fermentation (c'est ce qui permet la pétillance) mais va aussi créer un supplément d'alcool.

Grossièrement 1 g de sucre en refermentation donnera environ 0,5 g d'éthanol et 0,5 g de CO_2 , la formulation exacte est exprimée en moles.

Niveau de CO_2 initial (fermentation)

Toutefois le principal objectif de la refermentation en bouteille reste de créer une boisson plus ou moins effervescente suivant la recette. Cet objectif s'exprime en volume de CO_2 . Cette valeur correspond au CO_2 dissous dans la bière. C'est aussi le volume théorique qu'occuperait ce CO_2 si on l'extrayait complètement de la solution à une température de 0 °C et une pression de 1 atm, rapporté au volume de la solution initiale (bière). C'est une valeur sans unité (volume / volume).

La dissolution du CO_2 dans une solution aqueuse dépend uniquement de la température et de la pression. Suivant le style de bière considéré le volume de CO_2 varie. Les bières les plus courantes nécessitent un niveau compris entre 2,2 et 2,6, cette valeur sera notre cible : CD_{obj} .

En fin de fermentation la bière verte a atteint un niveau de CO_2 à l'équilibre et qui dépend uniquement de la température (la pression étant celle de l'atmosphère, soit 1 atm).

On a alors :

$$CD_{\text{init}} = 1.70769 - 0.059526 \cdot T + 0.00086022 \cdot T^2 \quad \text{avec } T \text{ la température du moût (°C)}$$

La température T qui compte, dans un espace ouvert, c'est la température la plus haute atteinte après la phase tumultueuse. Dans un espace fermé, c'est la température la plus basse qui compte.

Il faut se rappeler que pour le CO_2 se dissout dans le moût, une condition importante c'est la saturation en CO_2 . Dans un espace ouvert, le CO_2 perdu par échauffement ne sera jamais récupéré (car l'espace n'est pas saturé puisque ouvert). Dans un espace hermétique c'est différent puisque le CO_2 perdu reste dans le contenant et peut éventuellement être dissout à nouveau si la température chute.

Calculer l'amorçage pour la re-fermentation

L'étape suivante est alors de calculer l'ajout en sucre qui en fermentant en bouteille sera nécessaire pour atteindre l'objectif fixé (CD_{obj}). On suppose ici que qu'il s'agit de sucre de table dont la fermentation sera totale.

$$CD_{gen} = PS_{unit} \cdot \frac{2 \cdot M_{CO_2}}{M_{glucose}} \cdot \frac{1}{\rho} \quad , \text{ avec :}$$

- CD_{gen} : volume CO_2 théorique (v/v) généré par la fermentation de PS
- PS_{tot} : masse totale de glucose ajouté au moût (g)
- PS_{unit} : masse du glucose rapporté au volume du moût (g/L) avec $PS_{unit} = \frac{PS_{tot}}{V}$
- V : Volume du moût (L)
- $M_{CO_2} = 44,0095 \text{ g/mol}$, masse molaire de CO_2 impliqué dans l'équation de fermentation, qu'il faudra multiplier par 2, car la fermentation crée bien 2 moles de CO_2 pour 1 mole de Glucose (on ne tient pas compte de l'éthanol ici)
- $M_{glucose} = 180,1559 \text{ g/mol}$, masse molaire du glucose, impliqué dans l'équation de fermentation
- $\rho = 1,82953 \text{ gCO}_2/\text{L}$, densité du CO_2 en grammes par litre, aux conditions standards (1 atm, 20 °C), voir [chapitre sur les gaz parfaits](#). Cette valeur de densité varie de 1,96 à 1,8 g/L de 00 à 25 °C, à recalculer selon la température des premiers jours de fermentation.

Soit : $CD_{gen} = \frac{2 \cdot 44,0095}{180,1559} \cdot \frac{1}{\rho_T} \cdot PS_{unit} = \frac{0,48857}{\rho_T} \cdot PS_{unit}$ pour calculer la densité il faut prendre la température exprimée en Kelvin.

A $T=20^\circ\text{C}$ (293,15 K) a a pression atmosphérique, on a alors : $CD_{gen} = \frac{0,48857}{1,82953} \cdot PS_{unit} = 0,267 \cdot PS_{unit}$

La carbonatation finale sera donc environ : $C = CD_{gen} + CD_{init}$, soit :

$$CD = \frac{0,48857}{\rho_T} \cdot PS_{unit} + 1.70769 - 0.059526 \cdot T + 0.00086022 \cdot T^2$$

En inversant la formule on peut estimer l'ajout de sucre de table nécessaire pour obtenir la carbonatation souhaitée on a alors :

$$PS_{unit} = \frac{\rho_{T1}}{0,48857} \cdot (CD_{obj} - 1.70769 + 0.059526 \cdot T_0 - 0.00086022 \cdot T_0^2) \quad \text{g/L et } PS_{tot} = PS_{unit} \cdot V \quad \text{g.}$$

Pour ces calculs il faut tenir compte des températures, car cela fait légèrement varier le sucrage.

Pour C_{init} la température est celle de la mise en bouteille (à la fermeture de la bouteille) : T_0

Pour C_{gen} c'est celle de la moyenne des premiers jours de refermentation : T_1

12.2. Vieillessement

12.2.a. Affinage

A rédiger.

12.2.b. Dégradation

Une bière qui vieillit peut subir 3 principales transformations indésirables :

- Diminution de la limpidité (opacification) par la précipitation de composés protéiniques et oxydation des polyphénols ;
- Augmentation de l'astringence ou faux goûts (notamment par la présence de tanins) ;
- Assombrissement de la couleur, suivant notamment à l'oxydation.

Le principal ennemi du vieillissement est donc l'oxydation.

Oxydation

Chimiquement l'oxydation c'est l'oxydoréduction, c'est une réaction qui se traduit par le transfert d'électrons. L'espèce chimique qui capte les électrons est appelé l'« oxydant », celles qui les cèdent le « réducteur ». [Renvoyer à la partie chimie ?](#)

L'oxydoréduction s'exprime dans de très grandes situations, elle constitue une grande famille de réaction chimique. Même si son nom peu faire penser à l'oxygène, ce n'est pas uniquement lié ; toutefois l'oxygène est un oxydant très puissant et c'est surtout lui qui va nous intéresser lors du brassage.

L'oxydation peut intervenir à différents stades du brassage et avec plus ou moins d'intensité.

Elle se caractérise par le développement de faux goûts, notamment des flaveurs souvent décrites comme « carton mouillé » qui apparaissent avec le temps.

L'oxydation est un processus plutôt lent aux températures ambiantes, il prend du temps à se développer. Toutefois a chaud il est bien plus rapide à œuvrer.

Dès l'empâtage et durant toutes la partie chaude du brassage, il faut éviter le contact avec l'air et surtout l'incorporation d'oxygène. Cet oxygène dissous pourra réagir rapidement avec les acides gras, les houblons ou les alcools pour produire les précurseurs de l'oxydation et des faux goûts.

Il faut être particulièrement vigilant lors des transferts et versements ou il est préférable d'utiliser des siphons plutôt que de verser à gros bouillons. Lors du brassage proprement dit il faut mélanger en éviter les remous qui pourrait incorporer de l'air.

Le seul moment où on peut incorporer de l'air c'est lors de l'ensemencement afin de fournir aux levures de l'oxygène pour permettre une première phase de reproduction rapide.

Lors de l'embouteillage il faut remplir au mieux les bouteilles pour éviter d'y laisser un trop grand espace de tête qui contient de l'air (donc de l'oxygène).

13. Dans le verre

Lorsque l'on ouvre une bouteille de bière pour la verser dans un verre, se produisent des phénomènes physiques importants pour l'aspect, le goût et l'odeur de la bière à déguster juste après.

La bière, en bouteille notamment, est une solution saturée de gaz, notamment gaz carbonique (CO_2), voir le chapitre plus haut « [Re-fermentation en bouteille](#) ». Lorsqu'on ouvre la bouteille et qu'on la verse dans un verre des bulles, des bulles de gaz se forment dans la solution et remonte à la surface et forme une mousse plus ou moins abondante.

13.1. Pétillance et mousse

Ces phénomènes se produisent par la différence de pression dans la bouteille et celle « normale » dans l'environnement du dégustateur). La différence de pression provoque l'évacuation du gaz contenu dans la bière afin de rétablir l'équilibre de pression. Se forme alors des bulles (pétillance) et éventuellement une mousse.

La mousse qui se forme au sommet du breuvage dans le verre est plus ou moins appréciée suivant le style de bière et le consommateur. C'est aussi culturel. On parle de col ou faux col par exemple.

Pour avoir une belle mousse il faut contrôler 2 paramètres : la création de la mousse, qui dépend de la pétillance et la durabilité de la mousse (tenue de la mousse).

13.1.a. Pétillance (ou bulles)

Les bulles de CO_2 se forment lors de la dépressurisation à des endroits privilégiés dénommés « site de nucléation », qui sont des aspérités ou pré-existe de microscopiques bulles de gaz. Notamment dans la moindre aspérité même microscopique du verre ou accroché à des éléments (même très petit) solide contenu dans la solution.

Lorsque la bulle grossie, elle devient visible (macroscopique) : la légèreté du gaz décroche la bulle en formation qui remonte alors à la surface. Lors de sa remontée la bulle va entraîner des composés hydrophobes qui vont s'agglomérer à sa périphérie (voir figure ci-contre).

Souvent les verres dédiés à la bière ont une gravure au fond qui permet d'avoir un beau site de nucléation au fond du verre qui permet de créer un joli filet de bulle à partir du fond.

La formation de bulles va durer plus ou moins longtemps suivant le type de bière et la pression interne initiale (avant ouverture). Cette pétillance participe fortement au plaisir de la dégustation.

Une bière avec une tension de surface faible va plutôt créer des bulles fines qui entraîneront une mousse crémeuse.

La formation et le maintien des bulles est perturbé par les lipides contenus dans la bière, des verres sales ou des résidus de liquide vaisselle dans le verre.

Une température de service faible va entraîner une meilleure dissolution du gaz carbonique et donc réduire la pétillance en force mais en prolonger la production.

Pour une bonne pétillance (et donc créer une mousse potentielle) il faut un taux de gaz dissous suffisant et une température pas trop froide.

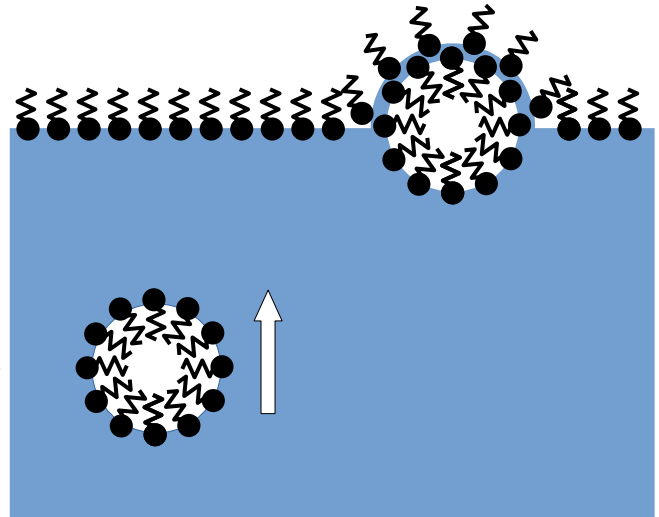


Figure 14: Formation de la mousse (détail)

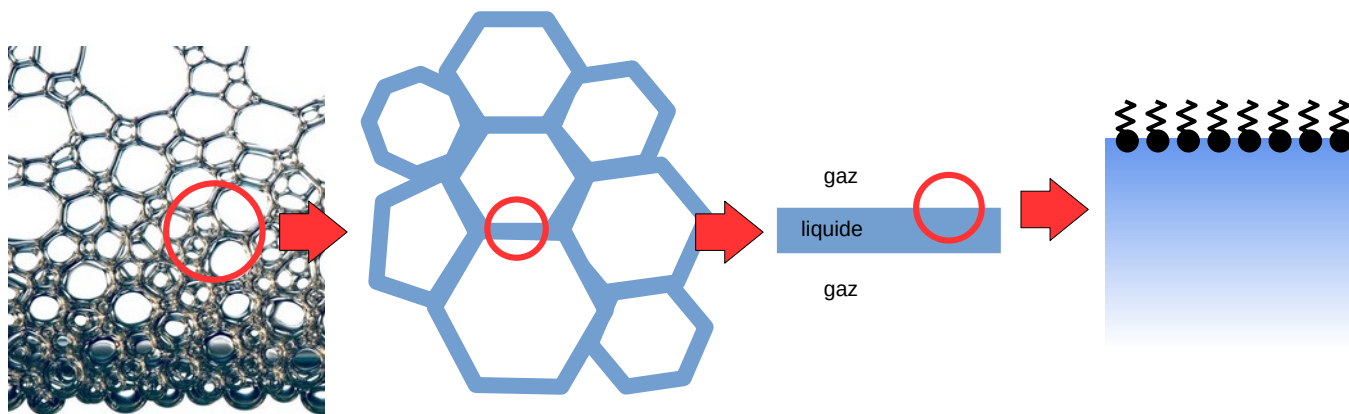


Figure 15: Détails structurels de la mousse à plusieurs échelles

13.1.b. Durabilité de la mousse

La pétillance est la base de la mousse, mais pour qu'il y ait une belle mousse stable il faut des conditions spécifiques. La mousse participe au visuel agréable de la bière et la protège durant la dégustation.

Lorsque les bulles de CO_2 remontent en surface elles accrochent des composés contenus dans la bière. Composés qui peuvent former une « peau » autour de la bulle. Ce sont les composés hydrophobes qui entraînent une faible tension de surface et qui permettent de stabiliser la mousse (la faire durer).

Les composés hydrophobes les plus influents sont :

- les protéines avec un poids moléculaire élevé ;
- les iso-humolones (acides alpha isomérisés du houblon).

Seules certaines protéines sont favorables à la mousse, d'autres provoquent un trouble de la bière qui nuit à la clarté.

Améliorer la mousse et sa durabilité

- Il faut qu'il y ait suffisamment de gaz dissous dans la bière pour pouvoir former une mousse ;
- Favoriser la présence, la formation et conservation des protéines :
 - Les malts peu modifiés, les céréales crues et avec un taux de nitrogène élevé vont produire des moûts avec plus de protéines, ce qui améliore la stabilité de la mousse. Un taux trop élevé de protéines peut pas contre réduire la limpidité de la bière finale ;
 - Malts cristal (caramélisés) ;
 - Céréales crues (Froment, avoine et orge) ;
 - Réduire ou supprimer le palier protéinique, ce qui permet de conserver des protéines plus grosses ;
 - La réduction de l'ébullition peut permettre de mieux conserver les protéines en limitant les cassures à chaud ;
 - Réduire la vitesse de refroidissement permet de réduire les cassures à froid et favorise la conservation des protéines ;
 - Lorsque le moût bout et fait la mousse ce sont des agents stabilisants qui sont perdus et qui se déposent sur les rebords de la cuve. Idem lors des transferts.
- Ajout de houblons a taux d'acide alpha important ;
- Utiliser des verres haut et de diamètre faible pour le service ;
- Utiliser des verres propres, sans résidus de lavage, ni d'essuyage, il est préférable de rincer abondamment l'intérieur du verre avant service (comme dans les bars) pour réduire les sites de nucléations potentiel ;
- Verser la bière doucement pour créer une belle mousse fine.

Les conditions d'une bonne mousse sont souvent en contradiction avec celle d'une bonne limpidité, car ces 2 phénomènes se base sur les protéines et c'est un équilibre qu'il faut chercher.

14. Dégustation (sensations)

La dégustation d'une bière, ce sont les sensations que l'individu ressent lors de la consommation. Il s'agit de sensations et donc essentiellement non mesurable mais plutôt descriptive et surtout très relative d'un individu à l'autre. Il existe toutefois des classifications et mesures plus ou moins précises.

La dégustation met en jeu essentiellement la **physiologie**. C'est *Aristote* qui a défini initialement les 5 **sens** de l'homme qui ont été plus largement redéfinis par *Bessa Vugo*.

Les sens sont les systèmes récepteurs de la perception. Chaque sens est formé par les récepteurs des stimuli, connectés à un ensemble de neurones dans le cerveau qui va traiter ces stimuli. Le phénomène permet à l'être vivant d'appréhender son environnement et notamment dans le cadre d'une dégustation d'apprécier la consommation de l'aliment. Des facteurs culturels entrent en compte dans cette appréciation, parfois certaines sensations légèrement désagréables peuvent apporter une appréciation positive (c'est le cas de l'amertume par exemple).

C'est aussi considéré comme un moyen de communication non verbal, ce qui en rend la description sensorielle parfois difficile à rendre... verbalement.

Aujourd'hui les sens sont à la fois « plus nombreux » que dans l'antiquité et « plus complexe ». Ils sont regroupés par familles, certains ne concernent pas l'homme (en **Gras** ceux qui nous intéressent dans le cadre étroit de la dégustation de la bière par l'homme) :

- Réception d'énergie électromagnétique :
 - **Vision**, détection des flux de photons et de leur vibration, c'est la vue.
 - Électro-perception, détection des champs électriques (poissons essentiellement) ; l'homme peut les détecter indirectement par le toucher (effet sur les poils par exemple).
 - Magnéto-ception, détection de la variation des champs magnétiques (oiseaux surtout).
- Réception d'énergie mécanique :
 - **Toucher**, détection de contact physique, de pression ;
 - **Ouïe**, détection des vibrations dans le milieu (air ou eau) ;
 - Écholocalisation, capacité de localiser des obstacles dans l'environnement par l'ouïe (chauve-souris et cétacés)
 - Proprioception, capacité de perception de son propre corps ;
 - Equilibro-réception, perception de l'équilibre de son corps physique (interaction avec la gravité et la cinétique).
- Réception de molécules (chimie) :
 - **Goût**, détection de molécules spécifiques par contact avec les récepteurs (papilles gustatives) ;
 - **Odorat**, détection de molécules spécifiques dans le milieu (air) par les muqueuses olfactives ;
- **Réception de flux thermique (Thermoréception)**, détection de la chaleur ou de variation de la chaleur du milieu par la peau ou dans la bouche ; proche du toucher.
- Réception poly-modale, d'autres sens moins précisément définis ou compris (douleur par exemple)

Dans le cadre de la dégustation d'une bière, ce qui intervient essentiellement dans l'appréciation :

- Avant dégustation :
 - Vision : couleur, limpidité, pétillance, mousse ;
 - Odorat : odeur que l'on peut ressentir en approchant son nez du verre ;
 - Ouïe : versement dans le verre et bruit de la mousse.
- Pendant dégustation (ingestion)
 - Goût : goûts perçus par les papilles gustatives présentes sur la langue ;
 - Odorat : odeur perçue par le nez, remontée des odeurs de la bouche vers le nez (rétro-olfaction) ;
 - Toucher : pétillance et température ressentie par la langue.

Ces éléments de sensation sont ensuite traités par le cerveau qui va mettre en relation l'expérience (le vécu) avec la mémoire ; et ainsi créer une expérience complète.

14.1. Vision

La vision est le premier sens mis en œuvre dans le cadre d'une dégustation. Ce sont principalement la couleur et la limpidité de la bière qui sont évalués.

Le récepteur de la vision est **l'œil**.

14.1.a. Couleur

La couleur est une perception du flux de photon et de leur vibration (longueur d'ondes).

La couleur de la bière provient principalement des ingrédients utilisés : céréales, sucres...

Lors de l'ébullition il y a une intensification de la couleur par la cuisson (Maillard, caramélisation).

La mesure de la couleur est réalisée par des procédés spécifiques et standardisés (mais hors de portée des amateurs). Voir le chapitre sur les [unités de mesures](#) pour plus de détails.

Dans le monde brassicole, il existe 3 standards de mesure des couleurs : EBC, SRM et Lovibond.

EBC et SRM nécessite l'usage d'un spectromètre pour mesurer l'atténuation d'une lumière d'un spectre précis (450 nm) qui traverse un échantillon d'épaisseur 1 cm et sans turbidité. Cette atténuation mesurée sur un seul point du spectre permet de spécifier environ 92 % de la couleur d'une bière.

La différence entre EBC et SRM c'est la constante de base définissant le point de référence. Entre EBC et SRM il y a un facteur multiplicateur de 1,97 (soit presque le double).

Le standard SRM a été défini pour être au plus proche de l'ancien système Lovibond et est utilisé dans le monde anglo-saxon. Le standard EBC est utilisé en Europe surtout.

Estimation de la couleur d'une recette

Malt Color Unit (MCU)

Pour les bières claires (EBC<21) le calcul du MCU permet une bonne estimation de la couleur finale. Il s'agit de faire la somme des couleurs des grains utilisés pondérés par leur poids dans la recette, le tout rapporté au volume total.

Le MCU est calculé suivant les mesures anglo-saxonnes (Couleur en SRM, poids en Livres et volumes en Gallons).

$$MCU_{SRM} = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i \times P_i)}{V_{total}}, \text{ avec :}$$

- C_i : couleur du grain i (SRM)
- P_i : Poids du grain i (kg)
- V_{total} : Volume total (Litre)

La formule ci-dessous est la version Européenne (en unité EBC, kg et litre)

$$MCU_{EBC} = 4,236 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (C_i \times P_i)}{V_{total}}$$

Équation de Morey

Dan Morey a mis au point une équation qui permet de rectifier le MCU pour les bières plus foncées (EBC >21). Cette équation est une bonne corrélation entre l'équation de base MCU, l'équation de Ray Daniels et celle de Mosher pour les bières sombres.

$$EBC = 1,4922 \cdot MCU_{EBC}^{0,6859}$$

14.1.b. Limpidité (aux origines du trouble)

La limpidité, c'est la transparence de la bière. C'est sa faculté à laisser passer la lumière et altérer le moins possible le flux de photons. La limpidité diminue avec la couleur et le trouble présent dans la bière (le trouble c'est l'inverse de la limpidité).

- Plus une bière sera sombre, moins elle sera transparente, moins limpide.
- Plus se formera du trouble moins elle sera transparente, moins limpide.

On parle de voile lorsque le trouble est léger.

Lors du brassage on cherche généralement à réduire le trouble de manière à avoir une bière limpide, brillante, souvent perçu par le dégustateur comme un signe de qualité (ce qui n'est pas forcément le cas pour tous les styles).

Références :

- [Trouble \(brassageamateur.com\)](http://trouble.brassageamateur.com)
- [Limpidité \(univers-biere.net\)](http://limpidite.univers-biere.net)
- [Améliorer la limpidité \(blog.gamb.fr\)](http://ameliorer.la.limpidite.blog.gamb.fr)

Les molécules en suspension présentent dans la bière sont essentiellement composées de 2 types :

- Molécules hydrophiles (principalement des protéines) et
- Molécules hydrophobes (principalement des tanins).

Les molécules hydrophiles vont se dissoudre dans l'eau tandis que les hydrophobes vont avoir tendance à former des micelles, en s'agglomérant en petits billes afin de réduire leur exposition à l'eau (c'est la forme optimale pour réduire les interactions). Cette formation dans la solution est appelée colloïdes. La présence de colloïdes rend la bière trouble, car il peut s'agir de formations visibles (macroscopiques).

La tendance à former des colloïdes (par les micelles) est contre carré par l'alcool ; les bières à forte teneur en alcool ont tendance à être ainsi moins trouble.

Les origines du trouble :

Trouble à froid

L'interaction entre les protéines et tanins (création d'une liaison hydrogénée) peut former un trouble à froid lorsque la température s'approche de 0 °C. Trouble temporaire qui disparaît lorsque la température remonte à 20 °C.

Trouble permanent

Les phénomènes d'oxydation peuvent rendre l'interaction protéines et tanins permanente conduisant à un trouble permanent.

Composition du trouble

- Composants inorganiques :
 - Principalement des ions métalliques (fer et cuivre), dû au contact du moût avec des éléments métalliques en fer ou cuivre. L'utilisation d'acier inoxydable (inox) ou de plastique réduit ces ions.
 - Acide oxalique ou « trouble vert », disparaît normalement pendant la fermentation et la garde en se fixant sur les surfaces externes des cuves.
- Complexe de protéines : proviens essentiellement de l'orge ;
- Polyphénols (tanins) : qui peuvent interagir avec les protéines pour former du trouble temporaire ou permanent :
 - Phénols simples, principalement issue du malt et parfois un peu des houblons ;
 - Flavonols, dérivés des houblons ;
 - Proanthocyanidines,

Ces éléments de base (monomères) peuvent se combiner pour former des chaînes de 1 (monomères), 2 (dimères), 3 (trimères), ou plus (polymères). Les monomères provoquent peu de trouble, par contre des dimères et trimères peuvent provoquer du trouble.

Facteur de formation du trouble

- Orge et malts
 - Variété d'orge : orge à 2 rangs et orge maritime ont la réputation d'une meilleure stabilité colloïdale ;
 - Modification du malt : préférer l'utilisation de malts moyennement modifiés, semble intervenir surtout sur le trouble temporaire ;
 - Teneur en protéines : les études ne sont pas très conclusives sur ce point, tout comme pour la tenue de la mousse certaines protéines semblent favorables, d'autres défavorables ;
 - Teneur en polyphénols : a un effet sur la stabilité colloïdale
- Processus de maltage : le trempage en eau alcaline semble améliorer la stabilité colloïdale ;
 - Concassage du malt : un broyage fin réduit la stabilité colloïdale ;
- Additifs : les céréales non maltées ne semblent pas avoir d'effet sur la stabilité colloïdale, le blé malté a par contre un effet notable sur le trouble temporaire ;
- Eau :
 - les sels minéraux peuvent interagir avec les phosphates du malt ce qui influe sur la stabilité colloïdale ;
 - La dureté de l'eau améliore la stabilité colloïdale
 - Les sels acidifiants ont un effet améliorant la stabilité colloïdale
 - Des taux de fer ou cuivre supérieurs à 1 mg/l provoquent des troubles colloïdaux irréversibles
- Houblons : il est conseillé de stocker les houblons au frais pour réduire le trouble
- Brassage
 - Conditions (favoriser l'action des phytases et cellulases) :
 - un pH faible améliore la stabilité,
 - un palier de 30 minutes vers 50° C tend à améliorer la stabilité colloïdale
 - Méthodes : la décoction améliore la stabilité colloïdale par rapport à l'infusion
 - Rinçage et filtration : la recirculation peut augmenter le trouble à froid, un rinçage plus froid (60° C) ou plus rapide ou plus acide améliore la stabilité, Ne pas soutirer au-dessous de 1,008 (extractions de tanins).
- Ébullition et refroidissement
 - Ébullition : une forte ébullition améliore la cassure à chaud et peut donc réduire le trouble s'il est filtré
 - Refroidissement : un refroidissement très rapide améliore la cassure à froid
 - Le Whirlpool permet de séparer les cassures et améliore la stabilité
- Fermentation : une fermentation à températures élevées améliore la stabilité, une garde à froid améliore considérablement la stabilité colloïdale
- Embouteillage : éviter l'oxydation, réduire la tête dans la bouteille

Trouble lié aux levures

Les levures flocculent (s'agglomèrent et sédimentent) à la fin de la fermentation, mais une part reste en suspension dans la bière. L'utilisation de levures qui sédimentent bien améliore la limpidité ; de même qu'une garde à froid (lagering) avant embouteillage améliore la sédimentation et donc la limpidité.

Améliorer la limpidité

- Utiliser un malt de bonne qualité, bien conservé. Concasser juste avant l'empâtage. Utiliser des houblons frais bien conservés.
- Utiliser une eau avec une dureté temporaire faible, faire bouillir 15 à 30 minutes pour en réduire la dureté.
- Ne pas dépasser un pH de 5,3 dans la maische afin de limiter l'extraction des tanins,
- Pour les malts bien modifiés, un palier à 40° C puis une chauffe rapide est recommandé (éviter le palier de 50 à 55 °C)
- Pour les malts peu modifiés ou contenant des céréales crues, un palier protéinique vers 50 à 55 °C est recommandé ; peut nuire à la formation de mousse
- Re-circuler correctement le moût au début du filtrage

- Ne pas rincer au-dessous de 1,008 à 1,010, sinon risque d'extraction des tanins qui vont nuire à la stabilité colloïdale Rincer avec une eau vers 70 à 75 °C pas plus.
- Ébullition forte et tumultueuse pour produire une cassure à chaud (*hot break*) qui agglomère les protéines en albumines
- Refroidissement rapide recommandé pour créer une cassure à froid (*cold break*) en coagulant les protéines, polyphénols
- La réalisation d'un tourbillon (*whirlpool*) après refroidissement permet d'entasser au centre les composants coagulés lors des cassures.
- Une étape de *lagering* (2 semaines entre 2 à 10 °C) ou *cold crash* (2 à 3 jours entre 1 et 5 °C) permet de mieux sédimenter les levures et composants solides
- Un transfert avant embouteillage (soutirage) permet de laisser dans la cuve de fermentation une partie des composés solides avant embouteillage. De manière générale il ne faut pas déplacer le seau de fermentation pour éviter de remélanger les composés solides qui ont sédimenté.
- Après refermentation en bouteille conserver au froid.

De manière générale la plupart des conseils pour améliorer la limpidité ont plus ou moins un effet inverse sur la tenue de la mousse.

14.2. Flaveurs (goût & arômes) : saveurs, arômes et sensations trigéminales

Référence : [wikipédia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Goût)

Le goût et les odeurs sont probablement les sens les plus utilisés lors de la dégustation de la bière.

Le goût est la faculté de récepteurs situés sur la langue de détecter des substances chimiques sous forme de solution par contact. Son objectif initial est de permettre la reconnaissance des saveurs des aliments.

Proche du sens de l'odorat qui lui détecte les substances chimiques volatiles (dans le milieu) et dont les récepteurs situés dans le nez sont aussi mis en jeu pendant l'absorption d'aliment (retro-olfaction).

Le mécanisme est similaire pour les 2 sens, ce sont des molécules qui entrent en contact avec les récepteurs situés à l'extrémité de neurones et qui permet la détection spécifique de cette molécule (ou classe de molécules similaires). Ce qui enclenche un signal électrique transmis jusqu'au cerveau qui va le traiter pour en faire une sensation liant l'expérience (le vécu) et la mémoire.

Une classification empirique, plus ou moins discutée, établit un classement des saveurs dites « primaires » en 5 grandes catégories :

- Sucré (sweetness) : saccharose ou sucre de table ;
- Salé (saltiness) : chlorure de sodium ou sel de table ;
- Amer (bitterness) : quinine, iso-humulone ;
- Acide (sourness) : acide citrique du citron ;
- Umami ou Savoureux : fromages, glutamates (saveur découverte en 1908).

Plus récemment d'autres saveurs ont été proposés :

- Oleogustus (acides gras)
- Pseudo-chaleur ou piquant (piment, gingembre, poivre)
- Astringent (tanins, thé, airelles)
- Métallique (sulfurate ferreux)
- Frais (menthe)

14.3. Chimie des flaveurs

Le goût et les arômes sont des sens chimiques qui nous permettent d'évaluer le contenu nutritif des aliments. Ce sens est essentiel à la survie de la plupart des animaux.

La détection des molécules sucrées et des acides aminés permet d'identifier et de choisir des aliments riches en énergie ou en protéines. La perception de ces molécules est à l'origine de saveurs agréables et ces composés sont en général **appétant**. À l'inverse, la perception de l'amertume est en général

désagréable ou **aversive**. La détection de l'amer permet d'identifier des composés potentiellement toxiques, par exemple certains alcaloïdes végétaux, parmi lesquels se trouvent des poisons mortels. Détecter le goût salé est de première importance pour maintenir l'équilibre électrolytique de notre organisme. En effet, notre corps perd constamment des ions sodium Na^+ lors de processus excrétoires et sécrétoires (urine et transpiration principalement). C'est pour ces raisons que nous sommes attirés et que nous aimons le sel (chlorure de sodium, NaCl). Quant au goût acide, il nous permet d'évaluer la maturité des fruits ou la présence d'une contamination microbienne dans un aliment. Ce goût nous permet aussi de protéger notre corps contre une consommation d'acides à trop forte concentration qui pourraient endommager notre dentition ou notre appareil digestif.

Tableau 8: Base chimique des saveurs primaires

Saveurs primaires	Exemple	Récepteur	Détection	Seuil (mol.L^{-1})	Commentaire
Sucré	Saccharose (sucre de table), glucose, fructose	Tas1R2 / Tas1R3	Glucides simples	0,01	Détection des aliments riches en glucides simples
Salé	Chlorure de sodium (sel de table)	ENac	Cl^-	0,01	Détection de la richesse en ion sodium.
Amer	Caféine, iso-humulone, quinine	Tas2Rs		0,001	Signale des aliments potentiellement toxiques
Acide	Acide citrique (citron), acide malique (pomme), acide lactique, acétique...	PKD2L1	H^+	0,003	Signale la présence d'acide potentiellement dangereux
Umami	Glutamate	Tas1R1 / Tas1R3		0,01	Détection des aliments riches en protéines

Dans la bière les 2 saveurs les plus importantes sont le sucré et l'amer ; une bière c'est principalement un aliment avec un équilibre entre ces 2 saveurs. Toutefois d'autres saveurs participent à la bière suivant les styles et les aromates ajoutés.

Notions apparentées

L'absorption d'aliments met en jeu un ensemble de sensation dont le goût et l'arôme sont primordiaux mais pas le seul, en effet la langue dispose aussi de capteurs de toucher. L'ensemble des signaux est transmis au cerveau par un canal trigéminal qui réunit les canaux du goût, des arômes et du toucher de la bouche ; d'où probablement ce sentiment diffus de la dégustation qui met en avant ces 3 sens tout en ayant du mal à en définir exactement l'origine.

Ainsi mâcher une feuille de menthe met en jeu ces 3 canaux :

- Toucher ;
 - Texture ;
 - Chaleur ;
- Pseudo-chaleur ;
 - Piquant : activation (légère) des récepteurs de la douleur ;
 - Fraîcheur : activation de récepteurs du froid par les composés mentholés ;
- L'astringence peut engendrer des sensations tactiles en activant des récepteurs du toucher (resserrement des tissus).

Trigéminal	Exemple	Récepteur	Élément détecté	
Froid	Menthe	TRPM8	Menthol	
Pseudo-chaleur	Piment	TRPV1	Capsaïcine	
Température	Moutarde, wasabi, radis	TRPA1	Isothiocyanate d'allyle	

14.3.b. Sucré

La saveur sucrée est une composante essentielle de la bière, elle provient des sucres résiduels du moût : les glucides qui n'ont pas été transformés par les enzymes (voir chapitre [Empâtage](#)) ou par les levures (voir chapitre [Fermentation](#)) et qui ont un pouvoir sucrant (détectable).

Ici il faut bien distinguer :

- Les sucres non fermentescibles (chaînes longues) qui apportent du corps (voir plus bas) mais n'ont pas de goût sucré (nous n'avons pas de récepteur sucré adaptés à ses longues chaînes) ;
- Les sucres détectables (on parle de pouvoir sucrant) mais qui n'ont pas été digérés par les levures soit par interruption de l'action des levures ou des glucides non réductibles par les levures mais perceptibles. Seuls ces derniers apportent une saveur sucrée.

Tableau 9 : Pouvoir sucrant des principaux glucides

Désignation	Formulation brute	Origine	Pouvoir sucrant (sans unité)	Calorie (kcal/g)
Saccharose	Glucose+Fructose	Canne à sucre, betterave... Raffiné	1,0	4,2
Fructose	$C_6H_{12}O_6$	Fruits, Saccharose	1,1 à 1,3	4,2
Galactose	$C_6H_{12}O_6$	Lait	0,2 à 0,3	
Glucose	$C_6H_{12}O_6$	Plantes amylacées, Saccharose, Maltose	0,2 à 0,7	4,2
Glycérol	$C_3H_8O_3$		0,6	
Isomalturose			0,3 à 0,4	
Lactose	Glucose+Galactose	Lait de mammifères	0,3	4,2
Maltose	Glucose+Glucose	Plantes amylacées	0,3	
Maltotriose	Maltose+Glucose	Plantes amylacées	aucun	
Maltitol	$C_{12}H_{24}O_{11}$		0,8	2,1
Mannose	$C_6H_{12}O_6$	Légumes, sève de Bouleau	0,6	
Miel		Abeilles	1,0 à 1,3	
Oligo fructose		Racine de chicorée	0,7	
Aspartame		Artificiel	200,0	
Sirop d'Érable		Sève naturelle de l'érable (concentré)	2,0	
Sorbitol	$C_6H_{14}O_6$	Fruits	0,5	4,2
Xylitol	$C_5H_{12}O_5$	Sucre du Bouleau	1,0	2,4
Amidon	Chaîne d'Amylose et d'Amylopectines	Plantes amylacées	aucun	4,2
Cellobiose	$C_{12}H_{22}O_{11}$	Hydrolyse de la cellulose	0,3	
Amylopectine	$C_{30}H_{52}O_{26}$	Amidon	aucun	
Amylose	$(C_6H_{10}O_5)_n$	Amidon	aucun	
Dextrines	$(C_6H_{10}O_5)_n$	Amidon	aucun	

14.3.c. Amertume

Référence : [wikipedia](#)

L'amertume est une composante importante de la bière qui contre-balance les sucres résiduels des malts et lui donne une caractéristique gustative importante. On pense généralement que l'origine de la sensation d'amertume serait un mécanisme ancestral primitif qui vise à nous protéger contre l'ingestion d'aliments toxiques. Sens qui aurait dérivé, chez l'homme par la culture, en source de plaisir gustatif.

Il existe un grand nombre de molécules amères qui sont chimiquement très diverses parmi lesquelles des peptides, des acides aminés, des sels (KCl), des édulcorants et de nombreux alcaloïdes dont certains sont

des poisons violents. Il faut noter cependant qu'il n'y a pas de lien évident entre l'amertume et la toxicité d'un composé : certaines molécules à saveur amère, loin d'être toxiques, peuvent avoir des vertus bénéfiques pour notre santé.

Les molécules amères que l'on trouve dans la nature ont principalement une origine végétale, elles peuvent aussi être produites par des champignons ou des micro-organismes.

Toutefois, de nombreux composés amers peuvent aussi être appréciés dans notre alimentation, comme ceux à l'origine de la légère amertume du chocolat, de la roquette ou de certaines boissons à base d'extraits de plantes.

Pour le brassage la mesure de l'amertume est réalisée avec l'unité IBU (International Bitterness Unit) et qui mesure le ratio d'acide iso-alpha isomérisé dans la bière.

Plus de détails sur l'IBU dans les annexes dédiés aux unités de mesures spécifique au brassage : Amertume (AAU et IBU).

14.3.d. Acidité

L'acidité a pour fonction initiale de détecter la non maturation des fruits ou de détecter une contamination microbienne. La perception d'acidité détecte principalement la présence d'ions H^+ par le récepteur PKD2L1.

Cette sensation est augmentée par la concentration en CO_2 dans une boisson : voir chapitre Acide et base.

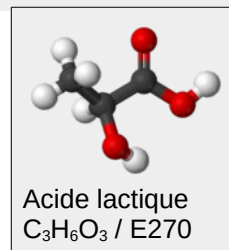
Acidité lactique

Référence : [Wikipédia](#)

Les cosses de céréales maltées contiennent des bactéries lactiques (qui sont capables de créer de l'acide lactique). En faisant tremper le malt dans un moût entre 44 et 48 °C, ces bactéries se développent et produisent de l'acide lactique. Composé souvent de lactobacilles (acidité douce) et pediococcus (acidité plus marquée).

Les acides lactiques doivent leur dénomination au lait, d'où ils furent extraits en premier. On les trouve aussi dans la choucroute et ils sont impliqués dans de nombreux processus biochimiques.

L'acide lactique est utilisé dans l'alimentation humaine comme additif (E270) comme acidifiant, anti-oxydant et exhausteur de goût. C'est aussi un bon détergent, détartrant et antibactérien.



Acidité acétique

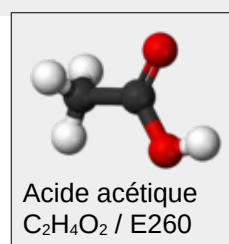
Référence : [Wikipédia](#)

Provient de l'acide acétique, principal constituant du vinaigre.

Arômes plus perceptibles, plus vif. Souvent provient de la fermentation spontanée (levures et bactéries sauvages), naturellement produit par *Saccharomyces* et *Acetobacter* et *Clostridium acetobutylicum*.

C'est aussi un désinfectant et agent de ménage.

Dans le corps humain c'est un résidu de la consommation d'éthanol.



Acidité malique

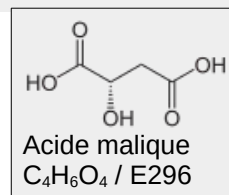
Référence : [Wikipédia](#)

Provient de l'acide acétique.

Plus présent (gustativement) que l'acide acétique, il est souvent perçu comme agréable dans une bière.

Provient souvent de fruits (pommes, raisins ou rhubarbre). Très présent dans le règne végétal, il contribue à une saveur agréable, souvent utilisé comme additif alimentaire (E296).

La vinification (fermentation malolactique) transforme les acides maliques en acides lactique bien plus doux.

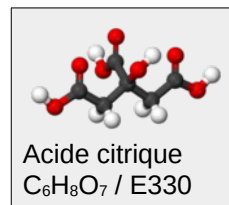


Acide citrique

Référence : [Wikipédia](#)

Provient de l'acide citrique, présent en abondance dans les citrons, d'où son nom. Sa source naturelle est essentiellement les agrumes, mais aussi présent dans de nombreux fruits et légumes.

C'est un additif alimentaire (E330) produit industriellement par fermentation fongique et utilisé comme acidifiant, correcteur d'acidité, agent de levuration et comme arômes.



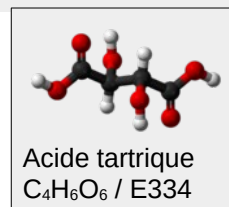
Acide tartrique

Référence : [Wikipédia](#)

Provient de l'acide tartrique, présent dans de nombreux végétaux, c'est le principal acide du vin (raisin).

Provient souvent des résidus de vins de tonneau.

C'est aussi un additif alimentaire (E334) utilisé comme antioxydant, régulateur de pH et séquestrant.



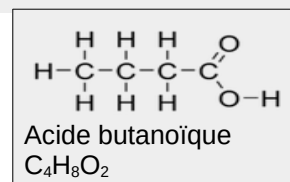
Acide butyrique (butanoïque)

Référence : [Wikipédia](#)

Provient de l'acide butyrique que l'on trouve dans le beurre rance, le parmesan. Il dégage une odeur forte de désagréable.

À éviter absolument, arômes très désagréables (même à faibles doses). Produit souvent par clostridium, megaspharera ou fusarium.

Pour les éviter, lors d'une fermentation spontanée ou mixte, il faut abaisser le pH du moût au-dessous de 4,0 le plus rapidement possible.



Sulfure de Diméthyle (DMS)

Références : [wikipédia](#), [wiki du brassage amateur](#)

C'est un composé organique sulfuré, liquide, volatil, inflammable et insoluble dans l'eau. Sa caractéristique principale est une odeur désagréable à haute concentration. Il apparaît lors de la cuisson de certains végétaux. Il peut être également le signe d'une infection bactérienne lors du brassage.

Toutefois toutes les bières contiennent un peu de DMS (notamment les Lager), il n'est indésirable qu'à forte concentration.

C'est un produit de décomposition du diméthylsulfoniopropionate (DMSP), il est aussi produit lors du métabolisme bactérien (flatulence bactérienne).

Le DMS a une odeur très caractéristique de chou cuit, qui peut être très inconfortable à haute concentration. Son seuil de perception olfactive est très bas : il varie entre 0,02 et 0,1 ppm selon les individus. Toutefois, il est disponible en tant qu'additif alimentaire servant, en très faible quantité, à donner du goût (arôme alimentaire). La betterave, le chou, le maïs, les asperges et les fruits de mer dégagent du DMS lors de leur cuisson.

Le DMS est également un composé émis par le procédé kraft de transformation du bois en pâte à papier et par l'oxydation de Swern.

La teneur de S-Méthyl méthionine (SMM) dans le malt est responsable du niveau de DMS dans le moût. Pendant l'empâtage, la SMM, le DMS et le diméthylsulfoxyde (DMSO) très soluble sont mis en solution. Le SMM peut être hydrolysé en DMS pendant le brassage, mais une grande partie du DMS est évacuée car il est très volatile. Le moût aura toujours une certaine concentration de SMM, de DMS et de DMSO - différents grains et techniques d'empâtage peuvent affecter ces concentrations. Pendant la fermentation, peu ou pas de SMM est converti en DMS, mais le DMSO peut être réduit en DMS par les levures pendant la fermentation.

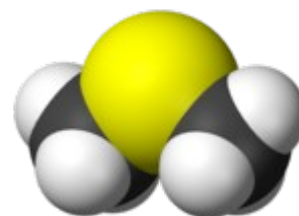


Figure 16: Molécule de sulfure de diméthyle
(source : wikipédia)

En condition normale, la vaste majorité des DMS est évaporé et par sa forte volatilité. C'est pourquoi il est important de ne pas couvrir la marmite de cuisson et de réaliser une bonne ébullition. Il est aussi important (pour minimiser les DMS) que le début du refroidissement soit rapide afin que la production de DMS stoppe car sans ébullition son évaporation est réduite.

La fermentation va encore réduire les DMS (de l'ordre de 30 à 40 %).

14.3.e. Le corps

Le corps d'une bière se réfère à la sensation gustative et sensation de « poids » du breuvage. Le corps est essentiellement obtenu par une densité finale élevée. Il s'agit donc surtout de sucres résiduels (non transformés par les levures ou par les enzymes) au pouvoir sucrant souvent faible. La présence de sucre modifie la fluidité de la bière, la rendant plus « épaisse ».

Le corps est un composé important du goût et des caractéristiques d'une bière et il est désirable dans beaucoup de styles. Inversement une bière dite « sèche » a peu de corps.

Augmenter le corps

On peut augmenter le corps en :

- Utilisant des malts caramélisés, qui contiennent des dextrines non fermentescibles et pratiquement sans goûts, mais qui enrichissent et alourdissent la bière ;
- Utilisant des malts grillés, qui contiennent d'autres sucres non totalement fermentescibles et qui ajoutent un goût légèrement sucré perceptible (douceur) ;
- Utilisant des céréales crues ou des malts peu transformés, qui contiennent des taux importants de protéines. Protéines qui participent peu à la fermentation et qui se retrouvent dans la bière finale et y apportent de l'épaisseur mais aussi diminuent sa limpidité. On utilise donc de forts taux de protéines plutôt dans les recettes de bière foncées pour éviter l'effet souvent indésirable d'une bière trouble ;
- Une température d'empâtage élevée permet de réduire l'efficacité de l'enzyme [Beta-amylase](#), ce qui va favoriser la conservation de chaînes longues et donc de sucres non fermentescibles.

14.3.f. Mousse

La partie mousse de la bière a un goût spécifique de par la concentration en composés spécifiques (voir paragraphe [mousse](#) plus haut), notamment les protéines, acides alpha et gaz carbonique.

Souvent son goût est plus amer que la bière elle-même.

14.3.g. Fond de bouteille

Avec les bières artisanales, dites sur lie, la refermentation en bouteille produit un agglomérat plus ou moins important de levures au fond de la bouteille. Cet agglomérat s'il est versé dans le verre va apporter du trouble et une amertume significative. Mais aussi des goûts spécifiques de levures qui sont parfois appréciés par certains palais.

14.4. Toucher

Le sens du toucher semble ne pas intervenir directement lors de la dégustation d'une bière, toutefois c'est oublier un peu vite que la langue dispose de capteurs du toucher.

14.4.a. Pétillance

La pétillance de la bière (voir plus haut dans le chapitre « Dans le verre »), ce sont les petites bulles de gaz CO₂ qui s'échappent de la bière. Ces bulles créent une sensation agréable en bouche par leur pétillance et une légère saveur acide.

Historiquement la bière a toujours été légèrement pétillante (par la présence de CO₂) mais la véritable pétillance que nous connaissons n'est apparue que récemment avec la mise au point de contenant hermétique (comme les bouteilles en verre).

14.4.b. Température de service

La température de la bière a une influence sur les sensations et les qualités gustatives.

Suivant les types de bière il y a des recommandations de température optimales.

Une température de cave est souvent recommandée ; les bières légères et claires supportent bien une fraîcheur plus importante.

14.5. Ouïe

Dans la dégustation de la bière, l'ouïe est peu utilisée, sauf les bruits émis lors :

- Dégazage rapide à l'ouverture de la bouteille ;
- Versement de la bière dans le verre, par le transvasement du liquide ;
- Par la mousse de bière lorsque les fines bulles éclatent en surface. Cela émet un pétilllement que l'on peut apprécier en approchant son oreille du verre.

Dans les 2 derniers cas, la forme du verre agit comme une caisse de résonance.

15. Styles de bière

Référence : [wikipédia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Bière)

Les bières ont des styles, de grandes catégories qui permet un certain classement (attitude très occidentale). Ces classements ont été variables dans le temps et les lieux. Plusieurs associations internationales ou nationales proposent des classements méthodiques assez précis dont l'objectif est de définir des catégories pour les concours (le plus connus est le BJCP dans sa version 2021). Récemment les évolutions apportées par le brassage amateur a quelque peu brisé les genres établis et quantité de sous-genres apparaissent. De plus les classements officiels oublient souvent de vieux styles parfois encore brassés. Le marketing use et abuse aussi de terminologie plus ou moins bien adaptée. Tout ceci rend complexe et peu scientifique le classement strict des bières.

Historiquement les styles sont d'origine Européenne (là où les bières classiques ont été brassés) puis ont évolués dans les anciennes colonies européennes principalement.

Classement les plus utilisés :

- [Beer Judge Certificate Program](https://www.bjcp.org/) (BJCP), association internationale fournissant les bases pour les compétition de bières. Bien que le BJCP prenne beaucoup de précaution dans l'introduction de leur guide de style, certains prennent ce guide au pied de la lettre, ce qu'il ne faut pas faire.
- [Brewers Association](https://www.brewersassociation.org/) (BA), association de brasseurs américains.
- [Mickael James Jackson](https://www.michaeljacksonbeer.com/), auteur Anglais reconnu d'ouvrages de références sur le whisky et la bière, il est reconnu comme l'auteur ayant remis sur le devant de la scène la bière, et popularisé le concept de style, avec son guide « *World Guide of Beer* » publié en 1977.

Les styles ne sont qu'un repère pour le brasseur amateur. Cela peut être une simple inspiration pour se libérer ensuite ; ou un guide pour participer à des concours officiels. Mais ce ne sont en rien des règles officielles de brassage : on peut faire la bière que l'on veut, quand on veut et comme on veut. Toutefois le concept de style permet de s'y retrouver dans la variété quasi infinie des bières et d'échanger entre brasseurs.

15.1. Éléments du classement

15.1.a. Apparence

Ce sont les caractéristiques visuelles de la bière, principalement sa couleur, sa limpidité ainsi que la tenue de sa mousse.

15.1.b. Arôme

Les arômes (odorat) qui se dégagent de la bière dans le verre, s'apprécient en portant le nez au verre. Constitué des malts, levures, alcool et aromates.

15.1.c. Flaveur

Mélange des saveurs, arômes et autres sensations qui se dégagent lors de l'absorption de la bière. Constitué des malts, levures, alcool et aromates.

15.1.d. Impression en bouche

C'est le corps de la bière (fluidité notamment) ainsi que sa pétillance. On parle de sensation sèche (bière avec une teneur en sucres simples faibles).

15.1.e. Force

C'est le taux d'alcool présent, qui est plus ou moins ressenti suivant les styles.

15.1.f. Statistiques

Souvent ces guides donnent des caractéristiques de base qui permettent de définir avec quelques chiffres un style. C'est largement insuffisant mais ça peut être une base, pour préparer une recette. On y trouve :

- **Densités** (sans unité, référence eau pure = 1,0)
 - Densité initiale (DI ou OG) : définis la densité initiale du moût avant fermentation, c'est un indicateur de la teneur potentielle en sucres
 - Densité finale (DF ou FG) : définis la densité finale de la bière, c'est un indicateur des sucres résiduels et en le comparant avec DI de la teneur en alcool (transformation opérée par la fermentation)
- Teneur en alcool (**TAV (ou ABV)**) : c'est le pourcentage en volume d'alcool de la bière
- Amertume (**IBU**) : c'est l'indice d'amertume de la bière (0 à 100)
- **Couleur** (EBC ou SRM) : c'est l'indicateur de la couleur du jaune très clair au noir en passant par jaune, orange, rouge, brun...
- Carbonatation : c'est l'indicateur de la quantité de CO₂ dans la bière, soit de sa pétillance.

15.2. Quelques « grands » styles

- Barley-Wine (Anglaise), très forte, très maltée, longue fermentation et vieillissement hors norme ;
- Bière de garde (Belge), forte, mettant en avant les malts, sèche ; c'est une bière qui est conservée en bouteille (ou en tonneau) plusieurs mois, d'où son nom ;
- Bitter (Anglaise), légère, peu pétillante, amertume présente ;
- Bock (Allemagne), très maltée, souvent légèrement colorée ;
- Gueuze (Belge), blonde, acide, très pétillante ;
- Indian Pale Ale ou IPA (Anglaise), blonde, forte, houblonnée, bière très à la mode depuis quelques années qui se décline désormais dans une grande quantité de sous-genre ;
- Kolch (Allemagne), fermentation haute, légère, limpide, blonde ;
- Lambic (Belge), beaucoup de blé, blonde, acide, fermentation spontanée, servie historiquement sans pétillance ;
- Pale ale (Europe centrale), fermentation basse, légère, sèche, limpide, amer, pétillante ;
- Pils / Pilsner (Allemagne), légère, lipide, très pétillante
- Porter (Irlandaise), brune, alcool et amertume modérée, céréales torréfiées présentes ; historiquement c'est une bière qui a participé à l'essor industriel de la bière en Europe ;
- Red ale (Irlandaise), cuivrée, plutôt maltée ;
- Saison (Belge), blonde, très sèche, modérément maltés et houblonnés ;
- Scotch ale (Écossaise), plutôt maltée, cuivrée, pétillance moyenne
- Stout (Irlandaise), noire, arômes grillés, plutôt maltée, amertume variable, historiquement lié à l'évolution de la Porter ; existe aussi en version sucré ;
- Trappistes (Belge), très variable pas en vrai style en soit mais caractérisés par des bières plutôt fortes avec du corps, mais équilibré. Avec des levures typiques produisant des phénols et esters aromatiques apportés des arômes fruités ;
- Vienna lager
- Witbier
- Weissbier (Allemagne), blonde, beaucoup de malt de froment, sèche et moelleuse

15.3. Autres classements

D'autres classements plus communs existent mais peu précis.

15.3.a. Couleur

C'est le « classement » utilisé par les non-connaisseurs : la couleur de la bière : blanche, blonde, ambrée, rousse et brune. C'est un bon indicateur... de la couleur, mais un indice très peu fiable du style de la bière et des saveurs que va expérimenter le dégustateur.

Ainsi on obtient une bière brune avec des malts grillés donnant un goût typique (Porter, Stout) ou par l'ajout de sucres caramélisés (Westmalle double) ; 2 styles qui n'ont rien à voir au niveau gustatif.

15.3.b. Alcool

La teneur en alcool peut parfois servir de classement, mais c'est peu pertinent car c'est surtout l'équilibre entre la teneur en alcool, les arômes maltés et les houblons qui créent une bière. L'alcool à lui seul ne suffit pas.

15.3.c. Levure

On peut distinguer les bières par leur type de levure, mais c'est assez pauvre comme classement :

- Haute fermentation (Ale), style historique et traditionnel ;
- Basse fermentation (Lager), style récent, bière légère avec peu de corps, c'est aujourd'hui la grande majorité des bières industrielles ;
- Fermentation spontanée (Lambic), style de fermentation pratiqué en Belgique ou dans le nord de l'Europe, produit des bières atypiques .

15.3.d. Origine

L'origine géographique est un indicateur qui a plus de pertinence, car de nombreux styles classiques sont originaires d'une région précise. Par contre certaines régions ou pays ont beaucoup de styles différents (Angleterre, Belgique, Allemagne...) et la mondialisation a, de nos jours, mélangé tout ça.

16. Histoires de la bière

Références :

- [Beer Studies](#) (licence cc-by-nc-sa), une bible sur l'histoire de la bière
- « *A comprehensive History of Beer Brewing* » de Franz G. Maussdoerffer, 2009
- Les travaux récents de Lars Garshol sur son [blog Larsblog](#) qui fait des travaux scientifiques et historiques sur la bière, notamment en Scandinavie et notamment autour des levures et houblons.
- « [Historical depictions, guild signs and symbols of the brewing and malting handicraft](#) », thèse de Matthias Trum, 2002-2006
- [wikipédia](#)

Note : toutes les dates sont données dans le repère standard européen, prenant la naissance de Jésus-Christ comme l'an 1 (il n'existe pas d'an 0) et sont signés « + » signifiant après J.-C. et le signe « - » avant J.-C.

16.1. Histoire de la bière et du brassage

16.1.a. Des origines troubles et cosmopolites

L'histoire de la bière semble commencer avec l'agriculture et la domestication des plantes riches en amidon : céréales, tubercules, fruits farineux. Son apparition est concomitante avec celle du pain dont elle est un proche parent. Les archéologues ne savent pas déterminer si la bière est apparue avant, après ou en même temps que le pain ("[First farmers, first malters](#)", [Merryn Dineley blog 1995](#)). On parle bien sûr d'ancêtre de la bière ou du pain, car ni l'un, ni l'autre n'avaient la forme ou le goût de ceux d'aujourd'hui.

Il aura fallu attendre environ 2 000 ans entre la domestication des céréales (agriculture) et l'apparition de la bière et du pain. Les historiens lient l'invention de la bière non seulement aux surplus de céréales, mais aussi à la socialisation en milieu proto-urbain.

Les premières bières semblent avoir été des gruaux de céréales non ou mal filtrés, très légèrement alcoolisés, quasiment sans bulles et consommés de manière sociale à la paille. Cela date du néolithique, vers -6 000.

À cette époque il était probablement difficile de discerner la bière, du vin ou de l'hydromel et les archéologues parlent volontiers de boissons mixtes. Ce n'est petit à petit que ces 3 boissons se sont différenciées.

Certains envisagent une bouillie fermentée paléolithique qui serait apparue accidentellement ou par l'effet du stockage de surplus de graminées cueillies puis humidifier par accident, mais cela n'est qu'une hypothèse assez peu probable, car pour produire de l'alcool il faut préparer les grains pour transformer l'amidon en sucres, puis que l'ensemble rencontre des micro-organismes provoquant la fermentation alcoolique. Il s'agit d'un processus global plutôt complexe. La probabilité accidentelle semble peu probable.

D'autres théories voient plutôt le moût comme source, c'est une mixture liquide sucrée qui aurait pu être appréciée seule puis aurait pu se mettre à fermenter « accidentellement » (et donc produire un peu d'éthanol) dans un second temps. D'autres encore envisagent même le malt comme origine, avant même le pain.

Les **premières régions** où l'on retrouve des traces archéologiques de fabrication de bière sont le croissant fertile du Proche-Orient ([wikipédia](#)) et le corridor de Yangtze ([wikipédia](#)) en Chine méridionale. Il est désormais certain que la (les) bière(s) soient nées à plusieurs endroits, à peu près, en même temps.

On retrouve aussi par exemple des traces importantes dans des textes anciens, comme « L'épopée de Gilgamesh » ([wikipédia](#)) ou des poèmes avec des références directes à des boissons alcoolisées semblable à la bière, au pain, ainsi qu'à des hybrides bière-pain.

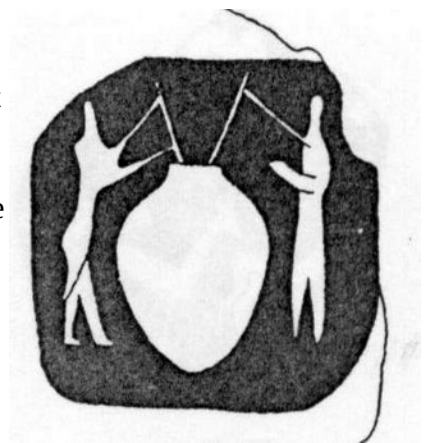


Figure 17: Deux buveurs de bière gravés sur un sceau à Gwara (Irak) daté de -3800

Dès son origine la bière (ou pseudo-bière) semble marqué par 3 conditions, quelle que soit la région :

- Des procédés techniques adaptés aux sources locales d'amidon (céréales, tubercules, fruits farineux...) ;
- Un système social de répartition de la richesse de cette source agricole d'amidons ;
- La recherche d'états psychiques modifiés et collectif.

16.1.b. Quelques découvertes archéologiques brassicoles archaïques

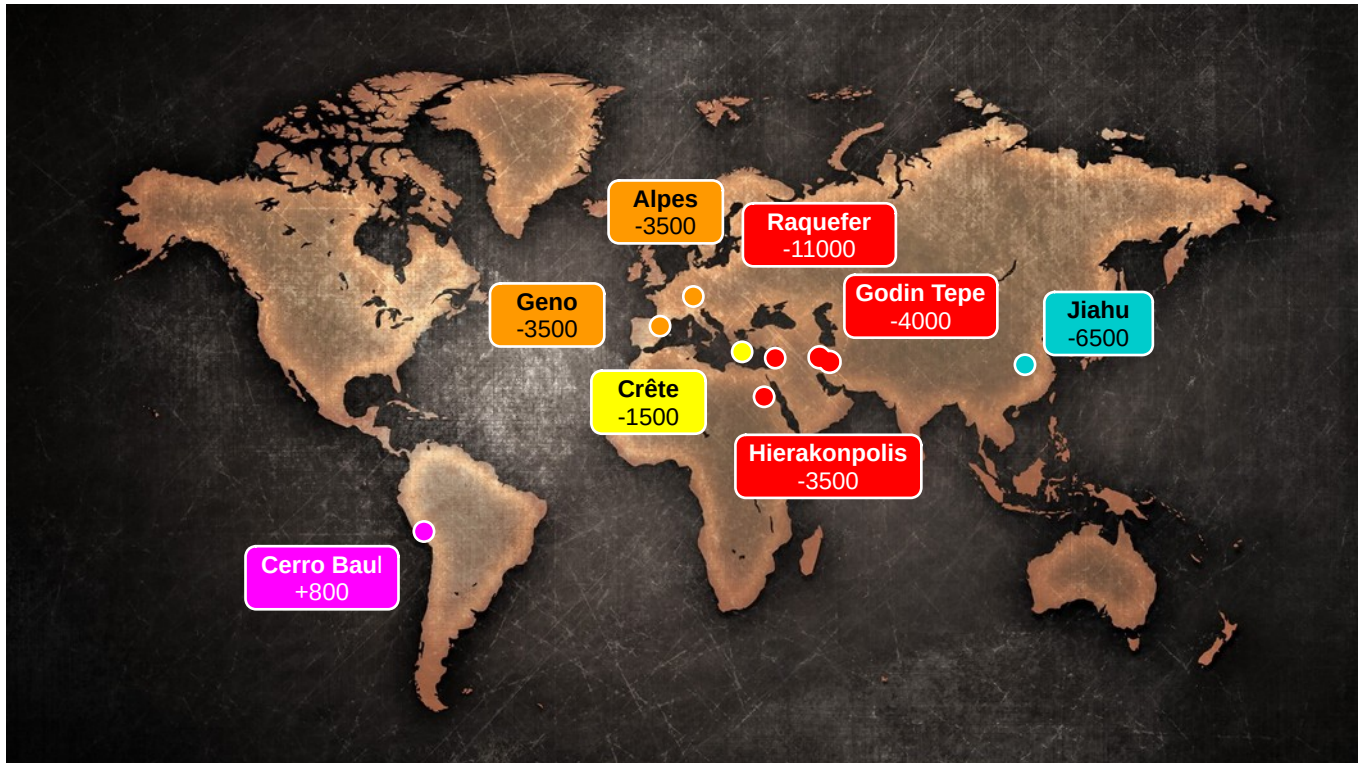


Figure 18: Sites archéologiques les plus anciens à ce jour

Raquefet (Jordanie), -11000 : amidon fermenté

En 2018, les archéologues ont découvert dans la grotte de **Raqefet** ([wikipédia](#)), dans l'ancienne Jordanie, des traces d'amidon germé et fermenté volontairement par un groupe de chasseur-cueilleur sur un site funéraire. On a ici une sorte de fermentation de céréales germées, pas forcément une bière...

Jiahu (Chine), -6500 : des boissons fermentées

Ont été découverts en 2013 à **Jiahu** ([wikipédia](#)), province de Henan en Chine, des traces archéologiques de 3 boissons fermentées : bière de riz, vins d'aubépine et de cerise et hydromel.

Godin Tepe (Iran/Irak), -4000 : de la bière et du vin

Ont été découverts à **Godin Tepe** ([wikipédia](#)), Nord des monts Zagros à la frontière Irano-Irakienne) des tessons de jarre ayant contenu une boisson fermentée à base d'orge (possible proto-bière).

Ainsi qu'à **Shahr-e-Sokhteh** ([wikipédia](#)) en Iran oriental, des résidus de bière (boisson fermentée à base de céréales) et de vins (boisson fermentée à base de raisin) dans une nécropole fondée vers -3 200.

Hierakonpolis (Égypte), -3500 : des brasseries

Ont été découverts en Égypte, de nombreuses jarres ou ont sédimentées des résidus de bière (boisson fermentée à base de céréales). À **Hiérakonpolis** ([wikipédia](#)), Haute Égypte, proche de Louxor, un site a été découvert en 1989 où était produit de la bière à grande échelle. Site daté de -3 500. Le site est composé de 12 grandes cuves semi-enterrées avec des parois réfractaires et d'une capacité permettant de produire 300 litres par jour. Les analyses ont révélé la présence de sucres caramélisés, de résidus de grains et des traces de fermentation alcoolique, ainsi qu'une probable activité depuis -5 500.

Europe –3500 : nouveau foyer de bière

Des traces de consommation de bière ont été trouvées en Europe continentale dès la fin du second millénaire, ce qui indique que la culture brassicole européenne a probablement été transmise du proche-orient avant la civilisation gréco-romaine. Les peuples celtiques, germaniques et nordiques étaient de grands buveurs de bière. Les premières bières européennes remontent probablement au 3^e et 4^e millénaire avant notre ère.

On a notamment retrouvé des traces de céréales maltées sur les sites **Hornstaad** (–3910), **Sipplingen** (–3600) et **Parkhaus** (–3160) situés entre la Suisse et l'Allemagne relevant de la culture Pfyn ([Wikipédia](#)). Et parfois avec des traces de pollen de houblons.

Grèce et Crète, –2000 : bières, vins et hydromel

De nombreuses traces de bières ont été retrouvées en Crète, Grèce et même Italie, notamment avant la période classique. Crète : **Myrtos** (–2200), **Apodoulou** (–1700) et **Chania** (–1500) ; souvent associé à du vin et de l'hydromel et parfois dans le même récipient.

Espagne, –1100 : bières aromatisées

Ont été découverts (**Genô**, Espagne) des traces de bières d'orge et blé, aromatisée à l'hydromel et plantes aromatiques (thym, armoise, sauge, menthe et romarin).

Pérou, +800 : Foyer brassicole en Amérique du Sud

La domestication de l'ancêtre du maïs (téosinte) débiterait vers –4 000 dans le sud-ouest du Mexique. Les recherches les plus récentes semblent montrer que le maïs a d'abord été consommé sous forme de boisson fermentée et que l'utilisation sous forme de farine est beaucoup plus tardive. Une brasserie a été découverte dans le nord du Pérou à **Cerro Baúl** ([wikipédia](#)), sous l'empire Wari (+600 à +1000) ; soit 4 siècles avant l'avènement de l'empire Inca. La brasserie comprend des meules, 2 cuves de 100 et 150 litres pour chauffer le moût, une chambre de fermentation, ainsi que des restes d'une baie rouge (*Shinus Molle*) qui servait probablement à l'aromatisation ou la préparation d'un vin mélangé à la bière (boisson mixte).

Ici aucun lien possible avec le proche-orient ce qui montre que la bière est apparue à plusieurs endroits dans le monde sans liens directs.

16.1.c. Celtes, Grecs et Romains

À la suite des Égyptiens, les civilisations grecques, puis romaines, étaient beaucoup plus orientées vers le vin que la bière, probablement pour des raisons culturelles. Les chercheurs pensent que grecs et romains voulaient se distinguer de leurs voisins Celtes (buveurs de bière), mais aussi que leurs théories du monde autour des 4 éléments (chaud, froid, sec et humide) plaçaient le vin dans le domaine du chaud et de l'homme, la bière était vue dans le domaine du froid et féminin. Ils avaient aussi semble-t-il un mépris pour le procédé de fermentation qui n'était pas vu comme « naturel » et ne pouvait concerner que le « peuple » pas l'élite (quelqu'un aurait dû leur dire que le vin était aussi fermenté).

Toutefois aussi bien grecs, mais surtout les Romains buvaient aussi de la bière, notamment en territoire de conquête ou le vin était peu disponible.

En Europe sur ces périodes, ce sont surtout les celtes et les germains qui ont développé une culture riche autour de la bière. Le climat plus humide fit **évoluer le maltage** (il était difficile de laisser les grains séchés à l'air libre dans ces régions, le procédé de séchage par chauffe douce se développa).

Après la conquête Romaine, les celtes adoptèrent la culture du vin des vainqueurs (tout en conservant la bière mais à moindre degré) ; c'est en Irlande que la culture celtes de la bière fut conservée et réapparue plus tard avec les moines irlandais.

Les écrits de Pline l'ancien mentionnent la bière sous différentes dénominations sur tout le territoire celtes : *Zythos* (Égypte), *Caelia*, *Cerea* (Espagne, plutôt à partir de blé) et *Cervesia* (Gaule).

Les Germains aussi buvaient beaucoup de bière, il semble que leur procédé de maltage n'utilisait aucun séchage et que le grain germé était aussitôt brassé.

Les voisins d'Asie mineure étaient aussi des buveurs de bière via les restes des cultures mésopotamiennes et babyloniennes.

16.1.d. Chrétiens, Germains et celtes

À la chute de l'empire romain, les francs et wisigoths ont ramené la bière au premier plan en Europe occidentale. Une culture importante avait été conservée en Irlande de par probablement, une présence romaine faible.

L'influence celtique (Irlande) et franques redonnera du lustre à la bière par le biais des monastères notamment à partir du 6^e siècle. Monastères qui vont petit à petit développer des procédés de fabrication plus moderne et vont aussi quelque peu monopoliser la fabrication de la bière en standardisant le processus et par leurs conservations (et protection) de leur connaissance antique du brassage.

16.1.e. Moyen Âge

Durant le Moyen Âge le développement urbain a aussi abouti à la professionnalisation du brassage (au moins dans les centres urbains) et la création des premières guildes, de taxes spécifiques et de règlements autour du brassage et des ingrédients. Le tout étant très contrôlés par les municipalités qui souvent autoriser le brasseur à brasser une seule recette.

En Europe centrale, les marchands de la Hanse ont développé un grand commerce international et notamment de la bière. En 1376, Hambourg comptait 475 brasseries qui ont brassé 133 000 hl cette année-là. C'était aussi déjà un port important concernant les ingrédients de brassage (céréales et houblons). Ce sont aussi les marchands de la Hanse qui ont développé les premières bières forte en alcool et en houblons qui permettent une meilleure conservation et ainsi leur transport par bateau à l'international (l'ancêtre lointain des IPA).

16.1.f. Marchands de la Hanse

Les historiens datent du 15^e et dans les régions de la Hanse les premiers styles différenciés de bières (stabilisation des ingrédients et recettes spécifiques). C'est aussi à cette époque que l'usage des malts devient petit à petit recentré sur l'orge, alors qu'auparavant l'avoine était très utilisée ainsi que le blé dans certaines régions.

Depuis le 12^e l'utilisation de grandes cuves métalliques (fer puis cuivre) permettent aux brasseurs urbains surtout, de fabriquer plus de bière et de meilleure qualité.

À cette époque semble exister principalement 2 styles de bière, la bière rouge (en fait plutôt brune, utilisant du malt plus ou moins grillé) et la bière « blanche » (plutôt blonde). Auquel s'ajoute selon certaines régions une bière de blé.

C'est vers le 16^e que se produit un autre grand changement en Europe, changement politique en premier lieu qui aura des répercussions sur le développement des brasseries. Ce sont d'abord les guerres puis la perte de puissance des villes au profit des territoires et pays. Tout ceci contribue à la disparition des privilèges (dont ceux de brassage). Des brasseries se créent dans les campagnes, surtout au sein des propriétés rurales des nobles, qui peuvent ainsi produire les matières premières sur place et brasser à moindre coût, des bières de qualité.

16.1.g. Bavière et Lager

Une autre révolution va se produire en Bavière durant le 16^e et 17^e siècle : le développement des Lager (fermentation basse), connu depuis le 15^e dans cette région. C'est la fameuse « *Reinheitsgebot* » (loi de pureté) de 1516, qui va déclencher cette révolution brassicole. En imposant des ingrédients strict et de qualité (eau, malt d'orge et houblon) ainsi que des périodes de brassage (interdiction l'été) et un type de fermentation (fermentation basse) ; cette loi va soutenir le développement d'un type de brassage différent et promouvoir la création de Lager de qualité. Les Lager présente un bel avantage au niveau de la stabilité et la durabilité, ainsi que saveurs différentes des autres bières traditionnelles (Ale).

Ce sera ensuite la technologie, permettant la maîtrise des températures et le désenclavement de la région par le rail, qui conclura cette révolution faisant de nos jours les Lager le style dominant des bières mondiales (en volume).

16.1.h. Empire britannique : Ale, Porter et industrialisation

La montée en puissance de l'empire britannique et sa marine amena une autre tendance au brassage : l'industrialisation. La marine britannique faisait de la bière (Ale) un élément fondamental des navires, mettant à disposition de chaque marin 1 gallon de bière par jour. La bière était aussi, comme ailleurs, un élément important du commerce maritime. Ceci apporta des changements importants en Angleterre et les premières créations de grandes brasseries industrielles. Ce phénomène se répandit petit à petit sur le continent, réduisant le rôle des brasseries de moindre importance et encore plus le brassage artisanal. Se répandit aussi la technique de brassage anglaise par chauffe indirecte bien plus avantageuse comme procédé industriel.

L'introduction de charbon comme source de chaleur a permis aussi de développer des variétés de malts plus nombreuses avec des chauffeuses plus rapides et plus fortes (malts grillés).

À cette époque les brasseries industrielles avaient l'avantage indéniable de pouvoir utiliser des matériels haut de gamme (et coûteux, mais amortissable par les volumes brassés) et de pouvoir s'approvisionner en matières premières de qualité, ce qui permet de produire une bière de qualité, stable à des coûts réduits.

Ce mouvement initié au 17^e se renforça au 18^e et 19^e. Ce changement a été porté par le développement de la « Porter », ce style anglais de bière brune qui a connu durant cette période un succès inégalé. Ce nouveau niveau d'industrialisation a été permis par l'émergence de nouvelles technologies comme la puissance vapeur permettant l'usage de moteurs et de pompes. Tout comme des progrès architecturaux permettant la création d'usine de brassage compact sur plusieurs niveaux, facilitant les manipulations de gros volumes, en jouant avec la gravité. C'est aussi à cette période que le refroidissement industriel apporta des progrès importants.

Tout comme les progrès métallurgiques permettant la fabrication de cuves de plus en plus grandes. En 1736 voit apparaître les premières cuves de 1 500 tonnes, puis en 1790 des cuves de 10 000 tonnes. Il reste l'anecdote de 1814 à Londres ([wikipédia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Anecdote_de_1814)) lorsqu'une cuve de 610 000 litres se brisa, entraînant les cuves voisines. C'est au total 1 470 000 litres de Porter qui se répand dans les rues avoisinantes. Cette inondation détruisit plusieurs maisons et tua 8 personnes.

D'autres progrès techniques (thermomètre, maltage par chauffe indirecte, vapeur pour stériliser...) contribuèrent au renforcement des brasseries industrielles et la disparition du brassage artisanal et fermier.

16.1.i. Période moderne

Les Lager ont reproduit et amplifié ce que la Porter a fait en Angleterre, une incroyable croissance et une industrialisation très importante. Industrialisation qui nécessite d'importants capitaux et écrase le marché, par les volumes produits, les bas coûts, le développement de la publicité et du marketing.

Cette tendance à l'industrialisation crut jusqu'à la première guerre mondiale, réduisant presque à néant le brassage traditionnel et imposant petit à petit une forte standardisation.

Tableau 10: Principaux styles en 1900 dans l'Empire britannique

	Brown Bavarian Lager	Pale American Lager	British Pale Ale
Malts	Orge d'été, germé 4 à 10 jours, séché à l'air et puis par chauffe indirecte vers 85 °C.	Orge à 6 rangs, séché 30 heures vers 86 °C. Usage de céréales crues	Germé 10 à 15 jours, chauffe indirecte par l'air 4 jours, 5 h à 75 °C
Brassage	Décoction	Infusion progressive à 67 °C	Infusion à 67 °C avec départ à chaud.
Fermentation	Fermentation basse 6 à 12 jours, 6 à 10 °C Atténuation moyenne	Fermentation basse en cuve fermée avec récupération du CO ₂ , pas de transvasement. 2 à 5 jours, 8 à 12 °C.	Fermentation haute, transfert après fermentation tumultueuse, 3 jours en primaire, 17 à 22 °C. Forte atténuation.
Finition	Jusqu'à 6 mois en cuve fermée	2 à 12 semaines vers 3 °C	Plus de 3 mois
ABV	2,7 à 4,0 %	3,8 %	4 à 5 %

16.2. Pratiques de brassage

Si de nos jours une bière est définie par du malt (orge germée) source d'amidon et d'enzymes qui permet de créer un moût sucré, qui est ensuite aromatisé, puis mis à fermenter ; ce procédé est loin d'être le seul à avoir été utilisé pour créer des bières au travers les âges et les régions.

16.2.a. Saccharification

De manière historique on distingue plusieurs familles de techniques pour la saccharification :

- **Insalivation d'une pâte amylacée** (la salive humaine contient des amylases, les céréales cuites puis mâchées et recrachées peuvent ainsi être saccharifiées, il suffit d'en-saliver 2 % de la pâte pour réussir la conversion). Technique encore utilisée par des peuplades Africaines (peut être la plus ancienne technique) ;
- **Germination des grains de céréales**, c'est l'ancêtre du maltage moderne (germination, cuisson, dégermage) obtenu au départ par une chauffe douce au bois ou la paille, puis plus tard avec des techniques plus sophistiquées avec l'introduction du charbon ;
- **Culture de Champignons amylolytiques**, technique de base en Chine et au Japon pour rendre fermentescible le riz (certains champignons peuvent hydrolyser l'amidon préalablement préparer par cuisson) ;
- **Plantes à complexes amylolytiques**, surtout utilisé en Afrique où certaines plantes (notamment des racines) contiennent suffisamment d'enzymes pour hydrolyser naturellement l'amidon (bouillie de Sorgho, de Manioc ou de Maïs) ;
- **Sur-mûrissement des fruits amylacés** (régions tropicales surtout), se pratique avec la banane, plantain, manioc, igname, taro, palmier-sagou... Ici c'est le sur-mûrissement naturel des fruits qui produit le sucre à partir de l'amidon, la fermentation alcoolique est alors simultanée par l'emploi de feuilles de végétaux ;
- **Hydrolyse acide d'un empois d'amidon**, ici l'action n'est plus du tout enzymatique, c'est un procédé purement chimique d'hydrolyse de l'amidon. Parfois utilisé en technique mixte (avec les précédentes) pour produire des bières acides. La phase acide est souvent produite grâce à des bactéries, comme l'acidification lactique par exemple (Keffir, Saké, Sahti...)

Les recherches historiques sur le sujet montre que certaines régions ont pratiquées une ou plusieurs des techniques de saccharification, pour parfois se spécialiser dans une seule ou des techniques mixtes, en fonction des conditions et des produits de base disponibles. Ce qui semble certains, c'est que chaque bassin brassicole originel s'est développé au départ de manière autonome et qu'ensuite des échanges ont homogénéisé les techniques pour finir aujourd'hui par la quasi-exclusivité de maltage et usage du houblon.

De même les techniques de brassage proprement dites ont beaucoup variées. Il suffit de penser aux bières traditionnelles asiatiques, où la saccharification et la fermentation se déroulent en même temps dans un milieu non liquide ; ce qui débouche sur des bières sans pétillance, ni mousse, mais plutôt fortes (12 à 15 %).

16.2.b. Maltage

Le maltage a été réalisé de différentes manières, notamment en Europe du Nord par chauffe indirecte et fumage dans des ateliers en bois ou à la paille. La céréale maltée si elle est souvent de l'orge (Europe), est aussi le maïs (Amérique du sud) et parfois le blé (Weizen).

Plus tard l'introduction du charbon permis de développer les malts de spécialités par une chauffe plus puissante.

16.2.c. Filtration

Le filtrage a longtemps été réalisé sur un lit de branches (genévrier notamment) ou de pailles.

Il existe et surtout a existé des bières non filtrées, souvent bu à la paille.

16.2.d. Cuisson

Les bières classiques européennes (à base de malt) ont vu leur technique évoluer fortement avec l'usage des cuves métalliques qui a permis de chauffer directement les contenants. Précédemment des techniques de chauffe plus complexes étaient mises en œuvre : Chauffage de pierres pour les ajouter à l'eau dans des cuves en bois. Chauffe indirecte dans des poteries enterrées ou encore moûts non bouillis (Raw Ale).

C'est aussi la pratique d'ébullition systématique qui permis de produire des bières qui se conservent plus longtemps et permis le développement d'un commerce de cette boisson.

16.2.e. Refroidissement

Le refroidissement (non naturel) n'est apparu que très récemment (vers 1856 en France). C'est aussi pourquoi la pratique du brassage était une activité saisonnière dans certaines régions, afin de bénéficier de températures clémentes permettant le refroidissement et la fermentation.

Refroidissement du moût naturel, une nuit en cuve ouverte. Puis mise en fermenteur ou tonneaux.

Le refroidissement n'était en outre pas nécessaire lorsque le moût n'était pas bouilli.

16.3. Petite histoire des céréales

L'histoire de la culture des céréales est un élément majeur de l'histoire alimentaire mondiale aux conséquences économiques, sociales et politiques très importantes. Fondement de l'alimentation dans la majorité des sociétés. Les céréales, leur provenance, la difficulté de leur culture, leur pénurie ou leur abondance sont des enjeux essentiels de l'existence humaine. Des émeutes frumentaires aux réformes agraires, les céréales ont joué un rôle central dans certains grands épisodes de l'histoire.

Tout a commencé avec la domestication des céréales qui a été concomitante avec la sédentarisation. La domestication des céréales a précédés les premières traces de boissons fermentées.

En savoir plus sur les céréales : Introduction à la biochimie des céréales

Origine des blés dans le Croissant Fertile

Les ancêtres des blés sont l'**égllope** et l'**engrain sauvage**. L'engrain ou blé primitif est la première céréale domestiquée, particulièrement rustique mais peu productive.

Les blés, plus généralement cultivés aujourd'hui, sont des plantes tétraploïdes (blé dur et blé Khorasan) ou hexaploïdes à 42 chromosomes (blé tendre et grand épeautre), caractéristique génétique extraordinaire qui indique un long travail de sélection de la part des agriculteurs.

C'est par le blé (engrain domestiqué) qu'a commencé l'agriculture au début de la période néolithique. La « révolution néolithique » s'est produite dans ce qu'on appelle le « Noyau levantin », région qui va de la vallée du Jourdain à l'Euphrate formant un large arc de cercle ou « Croissant fertile » (actuels Liban, Syrie, Sud de la Turquie où subsistent à ce jour des blés sauvages).

Le blé a d'abord été récolté à l'état sauvage puis cultivé. L'invention de la poterie (de -8 000 à -7 000) a permis de cuire les grains, sous forme de bouillies et de galettes non levées. Les céréales deviennent plus faciles à digérer. Gélifié par la température et moins dense, l'amidon des grains devient facilement attaquant par les enzymes salivaires et intestinales.

Cette action libère des sucres, absorbables par le tube digestif et facilement convertibles en énergie par notre métabolisme. On retrouve là le même procédé de saccharification enzymatique qui est utilisé par le brasseur.

Du sorgho en Afrique

On a trouvé dans une grotte au Niassa (nord-ouest du Mozambique) des traces de céréales (sorgho sauvage), sur des grattoirs de pierre datant de l'âge de la pierre (-100 000 ans). Il pourrait s'agir des premières traces connues de transformation de grains en farine ou gruau mais pas de céréaliculture dont les débuts datent d'environ -2 500 dans cette région (Sud du Sahara).

Cette farine dont les grains écrasés étaient sans doute consommés avec des fruits ou des tubercules ou peut-être déjà en bouillie fermentée. Cette découverte est discutée, car la preuve la plus ancienne d'utilisation de céréales (blé et orge) était datée, précédemment, de seulement –23 000 ans en Palestine.

Le maïs en Amérique Centrale

Jusqu'en 1960, on ignorait les origines historiques et géographiques du maïs. Les fouilles archéologiques ont révélé qu'après une phase de cueillette de maïs sauvage, il fut cultivé vers –3 000 dans le bassin de Teotihuacán, au sud-est de l'actuelle Mexico.

Le maïs était bien plus qu'un banal aliment : il a constitué le fondement de l'alimentation, de l'économie et de l'éclat des grandes civilisations précolombiennes : Incas, Aztèques et Mayas. Doté d'une valeur symbolique, il appartenait à leur mythologie, était présent dans leurs pratiques religieuses et leur art.

Milleths et riz en Chine

Les millets sont la première céréale cultivée en Chine, dans le nord et en Corée. La culture du riz a débuté il y a près de 10 000 ans lors de la révolution néolithique, d'abord en Chine. La collecte de riz sauvage (dont la balle se détache spontanément) y est attestée dès –13 000. Le riz cultivé (riz sélectionné pour son rendement) apparaît vers –9 000 après avoir subi des hybridations avec l'espèce sauvage pérenne *Oryza rufipogon* et l'espèce sauvage annuelle *Oryza nivara*, ces différents riz coexistent pendant des milliers d'années, ce qui favorise les échanges génétiques.

Ce n'est que vers –3 000 ans en Chine que le riz domestique est devenu, la seule forme de riz cultivée. Il est signalé dans la province chinoise du Hunan, puis au nord de l'Inde sur les rives du Gange. Le premier écrit sur la riziculture est une ordonnance impériale chinoise qui date de –2 800. Sa culture se répand vers le sud de l'Inde et au travers de la Chine, puis en Corée, au Japon, en Indonésie et en Thaïlande.

16.4. Petite histoire des aromates

Le premier usage documenté des houblons dans la bière date du 9^e siècle, toutefois ce n'est qu'à partir du 12^e siècle que son usage semble se répandre et ensuite très vite partout. Auparavant l'aromatisation de la bière se faisait par l'usage d'autres plantes, souvent genévrier ou un mélange parfois nommé « *gruit* » (mélange herbes aromatiques locales) et dont la composition était variables. Avec toutefois une dominance pour le genévrier, le pissenlit, la racine de bardane, le marrube blanc, le lierre terrestre, les orties, l'achillée mille-feuille...

L'archéologie montre aujourd'hui, que le houblon a été utilisé comme aromates pour certaines bières dès –3 500 dans la civilisation Celte par exemple. Mais de manière plutôt anecdotique et local.

La première trace écrite de la culture des houblons date de +736 dans la région allemande d'Hallertau.

En +738, Pépin le Bref (père de Charlemagne) avait un jardin au cloître de Saint-Denis où était cultivé du houblon, l'usage n'en est pas connu.

C'est, réellement, à partir du 13^e siècle que les autres aromates laissent petit à petit leur place à l'usage de plus en plus dominant du houblon, qui deviendra l'aromate quasi exclusif des bières, surtout avec le début des brasseries (quand la bière fermière perd aussi du terrain). Le houblon n'arrivera en Angleterre qu'à partir de 1524 où il faisait jusqu'alors que de timides incursions sous forme importée. Le genévrier conservera une place importante dans les bières fermières de l'Europe du Nord et de la Baltique jusqu'au 18-19^e siècle.

Le houblon (*humulus Lupulus*) de la famille des Cannanaceae est une plante herbacée vivace grimpante de type liane et un proche cousin du Cannabis, ils ont un ancêtre commun. Le houblon sera originaire de Chine et aurait lentement voyagé vers l'Europe. Sa présence (sous forme sauvage) est attestée dans toutes l'Europe depuis la fin du dernier âge glaciaire (–9 000).

Plus de détails sur l'usage pratique des aromates est disponible dans le recueil « *Bière et Aromates* ».

16.5. Petite histoire des levures

Référence : chapitre largement inspirés des travaux de [Larsblog](#)

Les levures, en tant que être vivant, n'ont été réellement découvertes que récemment, puisqu'il s'agit d'un champignon microscopique. Antoni Van Leeuwenhoek fut probablement le premier à les observer avec les premiers instruments optiques, vers 1680, les décrivant comme des structures globulaires. Ce n'est qu'en 1837 que Theodor Schwann les classa comme des champignons. Et c'est Louis Pasteur qui en 1857 étudia leur système de reproduction et permit de confirmer qu'il s'agissait bien d'êtres vivants.

L'homme pratiquait déjà le brassage, la vinification et la panification depuis plus de 9000 ans !

Ceci s'explique bien sur par la taille microscopique des levures qui n'a permis d'en découvrir la nature qu'avec des techniques optiques sophistiquées.

Bien que ne sachant rien de la levure, comme cellule vivante ; l'homme avait depuis longtemps introduit le concept. On le voit par le vocabulaire du brasseur qui parfois a donné un nom à cet acteur de la fermentation (zymo) et avait déjà compris que par exemple un bâton de brassage (ou anneau) permettait de conserver les caractéristiques de fermentation d'un brassin à l'autre. Il existait en Égypte la profession d'éleveur de levures (pour la bière et le pain).

16.5.a. Domestication

Le début de la domestication des levures par l'homme (non intentionnelle), se situe entre -11 000 et -9 000.

Au départ les premières boissons fermentées étaient souvent mixtes, c'est-à-dire à mi-chemin entre le vin, la bière et le gruau. Il en était de même pour les levures, qui se sont petit-à-petit spécialisées et ont coévolué avec leurs usages par l'homme (on parle de domestication).

Les études récentes en génétique reconstruisent de plus en plus précisément l'arbre évolutif des levures *Cereviseae*. C'est ainsi que, à ce jour, les scientifiques estiment que l'origine de la famille *Cereviseae* serait l'Asie et plus particulièrement la Chine (ou les levures sauvages ont le plus de divergences génétiques) et que les premières différenciations ont été pour le Saké (Japon) et le cacao (Afrique). Puis les levures de vinifications « Wine » se seraient différenciées. Puis les levures dites « Beer 2 ». Ensuite ce sont les levures « Mixed » qui se sont différenciées et finalement la famille « Beer 1 ». Cette dernière a ensuite évolué en branches majeures : « Belgium/Germany », puis « Beer-UK » et « Beer-USA ». Les « lager » sont une hybridation à partir de « Beer-1 », comme on le suppose pour les « Kveik » et « Hefeweizen ».

Ces domestications et coévolutions successives ont abouti à des spécialisations des levures.

Ainsi les levures de bières (Beer-1 et Beer-2 principalement) ont réduit leur adaptation à la survivance dans la nature pour favoriser leur stabilité génétique et de la faculté d'utiliser les maltotrioses. Ces résultats sont dus à la main de l'homme et à l'environnement plus ou moins contrôlé, c'est exactement ce qui caractérise une domestication.

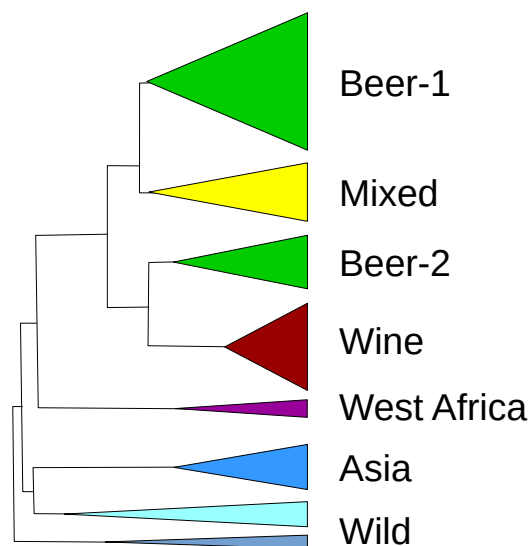


Figure 19: Domestication des levures (représentation phylogénétique)

16.5.b. Principales catégories génétiques

Wild

Levures purement sauvages, d'origine probablement asiatique et surtout Chinoise.

Asia

Principalement des levures de Huangjiu (sorte de bière chinoise), de Saké et des levures sauvages. Probablement les plus anciens débuts de domestication.

West Africa

Principalement des levures semi-sauvages.

Wine

Principalement des levures de vinification, mais aussi quelques levures pour la bière et les spiritueux.

Adaptation au milieu : meilleure résistance au cuivre, aux sulfites, et tolèrent mieux l'éthanol. Elles ont par contre quasiment perdu la possibilité de transformer les maltotrioses (le raisin n'en contient pas).

Adaptation au process : de par la saisonnalité de la vinification, ces levures sont restées proches des levures sauvages d'un point de vue reproduction et sporulation. Ce qui leur permet de survivre entre 2 saisons de vinification.

Beer-2

Essentiellement des levures pour le brassage, dont la divergence serait daté d'environ 1650.

Cette catégorie de génome a des variations très faibles, suggérant une origine commune malgré une grande diversité de nos jours.

Plus ancienne, cette catégorie a une résistance à l'éthanol supérieure à Beer-1.

Cette catégorie montre aussi une réduction importante de la création de saveurs phénolique qui semble ancienne, montrant probablement que l'homme a sélectionné les levures sur cette caractéristique.

Contrairement aux Beer-1 ces levures sont restés un peu plus proches de leur ancêtre sauvage et peuvent encore sporuler mais ont quand même fortement réduit leur reproduction sexuée. Résiste mieux que Beer-1 à l'acide acétique et a une tolérance thermique plus grande.

Mixed

Dans cette catégorie on trouve des levures à divers usage dont la panification, la bière, les spiritueux et même le vin.

Beer-1

C'est la plus récente grande divergence, les spécialistes la situent vers 1600 et serait lié aux débuts de la centralisation du brassage en Europe occidentale (grands centre urbain et monastère). Comme Beer-2 une origine commune semble probable, renforçant la fait que ce génome a été sélectionné en Europe a un moment assez précis et pour de probables caractéristiques importantes pour le brassage.

A ensuite génétiquement divergé en plusieurs sous-catégories :

- Belgium-Germany
- Beer-UK
- Beer-USA, les moins aptes à sporuler

Adaptation au milieu : fermentent mieux les maltotrioses, résistent moins bien à l'éthanol.

Adaptation au process : de par l'industrialisation du brassage, ces levures ont fortement réduit leur reproduction sexuée et leur capacité de sporulation pour favoriser le clonage. Ce qui les rend très dépendantes des conditions et peu apte dans la nature.

Tableau 11: Principales caractéristiques des familles de levures

Familles	Domestication	Survivance dans la nature	Reproduction sexuelle	Utilisation maltotrioses	Tolérance à l'alcool	Off flavors	Tolérance haute température
Beer-1	+++	--	-	++	-	--	--
Beer-2	++	--	-	+	+	-	+
Wine	+	+	+	--	+	+	+
Asia	-	++	+		++	+	+
Wild	--	++	+	-	+	++	+

Arbre phylogénétique : [Beer yeast family tree \(2019\)](#)

Étude Gallone (2016) : [Domestication and divergence of beer yeasts](#)

Pour plus de détail sur les levures, voir aussi : Introduction à la biologie et biochimie des levures

16.5.c. Réutilisation des levures

Le brasseur à toujours réutiliser les levures du brassin précédent. La légende que les brasseurs ne connaissaient pas les levures avant Pasteur est un mythe total. Certes s'ils ne savaient pas qu'il s'agissait d'un être vivant (eucaryote unicellulaire), le concept était présent depuis longtemps.

Les anciens brasseurs savaient « qu'il se passait quelque chose » et l'avait depuis longtemps nommé et savaient même l'entretenir. Mais sans savoir ce qu'il s'agissait de micro-organismes vivants.

Vers +250 on trouve des textes gréco-égyptien sur papyrus qui mentionne la profession de fabricants de levure (zymonrgos) pour la bière et le pain.

Pline l'ancien mentionne vers +77, que chez les Ibères et les Gaulois, les brasseurs prélèvent de la mousse lors de la fermentation et l'utilise pour faire un pain délicieux et très aéré.

L'archéologie a mis en évidence l'usage de bâtons ou anneaux de brassage, qui permettent de récolter les levures en brassant lors de la fermentation avec. L'outil est ensuite laissé à l'écart et par dessiccation les levures restent en attente sur ce dernier. Qu'il faut ensuite utiliser pour brasser la prochaine bière, après refroidissement, ce qui permet de l'inoculer. Ce procédé ancien, ne fonctionne pas avec les levures industrielles qui ont perdu leur pouvoir de sporuler et donc de se protéger lors de la dessiccation.



Figure 20: Anneau de brassage Norvégien, 19e siècle
Source : wikimedia commons

16.6. Les grandes étapes technologiques

Tableau 12: Table chronologique des grandes étapes technologiques

Année	Technologie ou découverte	Lieu
-11000	Boissons fermentées mixtes	Jordanie
-10000	Domestication des céréales et sédentarisation	Mésopotamie
-7000	Socle technique : poterie, vannerie, pierre à moudre. Boissons fermentées mixtes (miel-fruits-grains)	Chine, Mésopotamie
-5000	La bière se détache des autres boissons fermentées mixte. Insalivation des grains cuits.	Chine, Mésopotamie
-4000	Maltage des céréales Invention de la brasserie chaude	Chine, Mésopotamie
-2500	Chalumeau filtrant pour boire (paille)	Mésopotamie
-2000	Hydrolyse acide de l'amidon	Nomade Indo-Européen
	Recyclage des drêches (nourriture pour animaux)	Mésopotamie
	Contrôle des brassins par le ratio eau/grain	Mésopotamie, Égypte
-500	Clarification et filtration	Chine, Inde
	Plantes amyolitiques	Afrique
-100	Tonneau pour transporter la bière	Gaule
700	Variation de densité par lavage de la maische	Europe monastique
9 ^e	Le houblon apparaît comme aromate de brasserie	Europe occidentale et

		centrale
15 ^e	Fermentation basse (Lager)	Bohême, Bavière
1516	Décret de la pureté de la bière définissant les ingrédients exclusifs de la bière Bavaroise : malt d'orge, houblons et eau.	Bavière
1632	Invention de la bouteille en verre moderne (Kenelm Digby)	Angleterre
1680	Antoni van Leeuwenhoek observe pour la première fois des animalcules bourgeonnants dans la bière, ce sont en fait des levures.	Hollande
1715	Contrôle des températures du maltage et brassage par le thermomètre (Fahrenheit et Combrune)	Pays-Bas, Grande-Bretagne
1780	John Richardson met au point le saccharomètre pour mesurer le taux de sucre du moût.	Angleterre
1789	Antoine Laurent de Lavoisier étudie et décrit très précisément les transformations chimiques de la fermentation.	France
1810	Louis-Joseph Gay-Lussac établit que l'éthanol et le dioxyde de carbone sont les produits de la décomposition du sucre par la fermentation.	France
1831	Pasteurisation (conservation et stérilisation)	France
1833	Découverte des diastases qui ont le pouvoir de séparer l'amidon en sucres dans les céréales par Anselme Payen et Jean-François Persoz. Ce sont en fait les premières enzymes découvertes.	France
1837	Cagniard Latour, Theodor Schwann et Friedrich Traugott Kützing observent de manière séparée au microscope les levures dans la bière.	France, Allemagne
1843	Densimètre (saccharomètre) et table de calculs pour déterminer la quantité d'alcool potentiel du moût (Carl Balling)	Prague
1854	Louis Pasteur démontre (avec l'aide de Emmanuel Bigot-Tilloy) que ce sont bien les levures qui sont responsables de la fermentation alcoolique de la bière et isole le micro-organisme <i>Saccharomyces</i> parmi tous ceux présents dans le moût.	France
1856	Premiers systèmes de refroidissement du moût (Baudelot de Sedan)	France
1871	Protection bactériologique du moût et dépôt d'un brevet pour un procédé de fabrication de la bière par Louis Pasteur.	France
1873	Froid artificiel en brasserie (Carl von Linde) qui permet l'essor de la fermentation basse	Munich
1876	La brasserie Carlsberg crée une fondation et un laboratoire scientifique, c'est le début de la rationalisation de la fabrication de la bière.	Danemark
1880	Mise au point de procédés de culture de souches de levures pures (Emil Hansen)	Danemark
1896	Édouard Buchner démontre que ce sont des composés chimiques contenus dans les levures qui permettent la fermentation alcoolique, il nommera ce composé les zymases, ce sont des enzymes.	Allemagne
20 ^e	Fermentation continue en brasserie industrielle	
	Automatisation complète des procédés de brassage	

À ces étapes essentielles, s'ajoutent les technologies industrielles annexes qui permettront la révolution industrielle de la bière : fabrication des bouteilles en verre, chemin de fer, froid industriel... Ce qui va transformer le paysage technique et économique de la bière.

La bière a commencé son chemin comme une boisson sociale et probablement spirituelle, pour devenir une boisson familiale de ferme, puis une boisson industrielle mondialisée.

17. Introduction à la Thermodynamique

Référence : [wikipédia](#)

La thermodynamique est une branche de la physique dont l'objet est l'étude des propriétés des corps et celle des phénomènes faisant intervenir le travail, la chaleur et l'énergie.

Cette science comprend notamment l'étude des corps en prenant en compte l'influence de la température sur leurs caractéristiques. Cette science examine aussi la transformation d'une énergie existant sous une certaine forme en une énergie se présentant sous une autre forme (énergie mécanique, thermique, chimique ou électrique).

Rappel : en thermodynamique les températures doivent être exprimées en Kelvin et non pas en degré °C. Voir le chapitre initial sur les [unités de température](#).

Important : la thermodynamique est un domaine complexe ou les calculs le sont encore plus et impossible à utiliser dans la réalité du brassage, sauf à faire de grosses approximations. L'objectif ici est d'introduire la thermodynamique est d'en déduire des conseils d'ordre pratique. Il ne s'agit (encore moins que pour les autres chapitres) d'un cours.

17.1. Notions de thermodynamique

En complément du principe fondamental de la **conservation de la masse**, la thermodynamique est basée sur quatre postulats :

- Le Principe Zéro concerne la notion d'**équilibre thermique** (voir plus bas) ;
- Le Premier Principe (principe d'équivalence) porte sur le caractère **conservatif de l'énergie** (l'énergie totale d'un système isolé est constante) ;
- Le Deuxième Principe (principe de *Carnot*) révèle la notion d'**irréversibilité** et le concept d'**entropie** (l'énergie d'un système passe nécessairement et spontanément de formes concentrées et potentielles à des formes diffuses et cinétiques). De ce point de vue la chaleur est considérée comme une dégradation qualitative de l'énergie.
- Le Troisième Principe (principe de *Nernst*) s'intéresse enfin aux propriétés de la matière dans le voisinage du zéro absolu (-273 °C). Cas peu courant lors du brassage.

17.1.a. Énergie thermique

L'énergie thermique est l'énergie cinétique d'agitation microscopique d'un objet, qui est due à une agitation désordonnée de ses molécules et de ses atomes. L'énergie thermique est une partie de l'énergie interne d'un corps. Les transferts d'énergie thermique entre corps sont appelés transferts thermiques et jouent un rôle essentiel en thermodynamique. Ils atteignent un équilibre lorsque la température des corps est égale.

17.1.b. Chaleur

En thermodynamique, la notion de chaleur correspond à l'énergie échangée lors d'un transfert thermique depuis ou vers un système thermodynamique. En tant qu'énergie l'unité de mesure est le Joule (J) et son symbole est Q.

Cette notion est à différencier de l'usage commun qui définit la chaleur comme la perception humaine de l'énergie thermique et de la température.

17.1.c. État de la matière

L'état de la matière a un lien fort avec la thermodynamique.

Les 3 états de base de la matière sont : solide, liquide et gazeux.

Voir le chapitre États de la matière dans la partie Chimie, et notamment la notion de diagramme de phase.

17.2. Brassage et thermodynamique

Le brassage comporte de nombreuses étapes liées directement à la thermodynamique : notamment lors de l'[empâtage](#), de la [cuisson du moût](#) ou du [refroidissement](#). La thermodynamique intervient aussi lors de la carbonatation.

L'empâtage et la cuisson du moût sont réalisés dans une marmite (de préférence en inox) sur un feu vigoureux. Marmite couverte dans un premier temps pour porter à ébullition, puis découverte (ou partiellement découverte) pour la cuisson proprement dite.

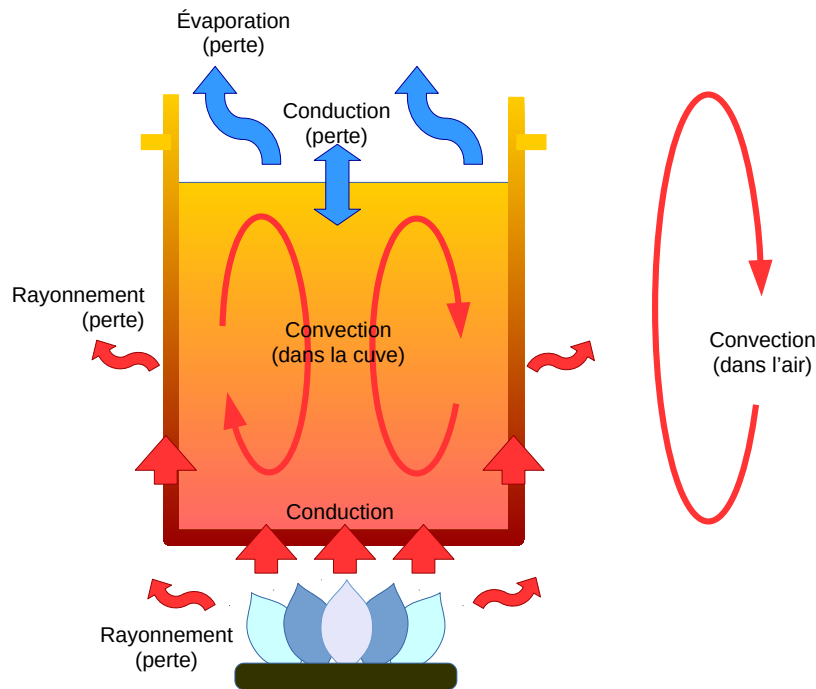


Figure 21: Thermodynamique et brassage

La quantité d'énergie mise en jeu répond aux lois de la thermodynamique :

- Le brûleur sous la marmite apporte une quantité d'énergie sous forme chimique (feu) qui se transforme en énergie thermique (chaleur) ;
- Par **rayonnement** et **conduction** cette chaleur est transmise pour partie dans l'air ambiant et pour partie à la marmite ;
- Par **conduction** et **rayonnement** la marmite chauffe la solution contenue (là aussi une partie de l'énergie est perdue par diffusion dans l'air) ;
- Par **conduction** et **convection** la chaleur se propage dans la solution (la maische ou le moût) ;
- Une partie de la chaleur se perd par **évaporation**, puis par **ébullition**.

Un phénomène simple (chauffer de l'eau) met en jeu un ensemble complexe de transfert d'énergie.

À nouveau la thermodynamique est mise en jeu lors du [refroidissement](#) du moût.

- Ce dernier perd de l'énergie thermique en transmettant son énergie par **diffusion**, **convection** et **évaporation** vers le milieu plus froid jusqu'à atteindre un état d'équilibre.

17.2.a. Échanges thermique

Les échanges d'énergie thermiques ou transferts thermiques, sont de 3 types fondamentaux :

- **Conduction (ou diffusion)**, transmission par les particules de matière de proche en proche par l'agitation moléculaire des éléments. Concerne surtout les solides. C'est par exemple ce qui se produit lorsqu'une résistance thermique chauffe au contact une marmite ou que la marmite chaude transfère de la chaleur à la maïsche contenu.
- **Convection**, transmission par les mouvements d'ensemble d'un fluide, concerne surtout les liquides et gaz. C'est par exemple ce qui se produit dans un liquide en train de chauffer dans une marmite, un mouvement de convection va créer un courant dans la solution qui va homogénéiser les températures. C'est le cas du moût chauffé ou refroidit.
- **Rayonnement (ou radiation)**, transmission par propagation d'ondes électromagnétiques, concerne surtout les milieux « non matériels ». Le spectre de l'onde s'étend du domaine des micro-ondes à l'ultra-violet en passant par le spectre visible. C'est qui produit la lumière des ampoules ou la chaleur du soleil par exemple.

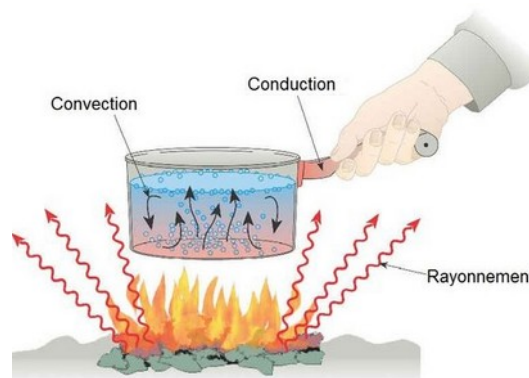


Figure 22 : les modes de transfert thermique

Tableau 13: Mode d'échanges thermiques

Mode de transfert	Matière du transfert	Milieu du transfert	Transport de matière
Conduction	Solides et fluides	Au sein d'un corps ou par contact entre 2 corps	non
Convection	Fluides	Au sein d'un fluide ou au contact d'un fluide et d'un solide	oui
Rayonnement	Tous, y compris le vide	À partir d'un corps rayonnant vers un autre	oui

Dans les cas réels le transfert d'énergie thermique se réalise souvent par une combinaison de ces modes de transfert (voir exemple Figure 22 : les modes de transfert thermique).

17.2.b. Équilibre thermique

Lorsque que 2 corps de température différentes entrent en contact, ils échangent de l'énergie thermique. Lorsque leur température respective devient égale, ils se trouvent en équilibre thermique. C'est le principe zéro de la thermodynamique.

Dans le cadre du brassage ce principe d'équilibre est mis en œuvre a plusieurs étapes :

- Chauffe de la maïsche ;
- Mélange d'eaux à différentes températures (décoction ou infusion) ;
- Ébullition du moût ;
- Refroidissement du moût ;
- Maintien température de fermentation ;
- Conservation de la bière en cave.

Ceci se réalise en manière très complexe. Si par exemple on prend l'exemple de l'empâtage, il s'agit de chauffer puis de maintenir à une température fixe la maïsche pendant une certaine durée.

- La maïsche est composée de plusieurs matériaux plus ou moins homogène (eau, grains concassés et écorces de grains essentiellement) ayant chacun des caractéristiques thermiques différentes ;
- La maïsche est contenu dans un contenant (cuve inox de brassage ou glacière plastique isolée). Dans ce contenant elle est aussi au contact avec l'air contenu. La cuve inox a des caractéristiques thermiques spécifiques, l'air aussi ;
- Le contenant est lui en contact avec l'air ambiant extérieur ; qui a lui aussi des caractéristiques thermiques dépendantes des conditions et qui de plus est turbulent ;

- Le contenant est chauffé par un dispositif de chauffe qui lui transmet de l'énergie thermique. Dans le cas d'une chauffe directe au gaz, une partie de l'énergie se dissipe dans l'air au lieu de chauffer la cuve.

Ce produit alors un ensemble très complexe d'échanges entre tous ces matériaux (eau, grains, inox, air). Ces échanges sont tellement complexes qu'ils ne sont pas réellement modélisables (sauf à utiliser des logiciels de simulation spécifiques), par contre on peut réaliser des estimations.

- On peut ainsi considérer :
 - La maische comme de l'eau pure ;
 - L'air ambiant comme homogène, sans turbulence et à température constante durant l'empâtage (si le local est grand et aéré c'est une approximation correcte) ;
 - Prendre un coefficient de perte générique pour la chauffe (pour une chauffe gaz à flamme on considère souvent une perte de 50 %)

Même dans ces conditions, l'exercice est délicat et peu précis, mais suffisant pour déterminer la puissance de chauffe nécessaire par exemple.

17.2.c. Équilibre thermique de base

De manière statique (sans apport ou perte d'énergie par ailleurs, donc totalement théorique) on peut caractériser l'équilibre thermique de 2 corps par :

Température d'équilibre entre 2 corps :
$$T_E = \frac{T_1 \cdot C_{p1} \cdot m_1 + T_2 \cdot C_{p2} \cdot m_2}{C_{p1} \cdot m_1 + C_{p2} \cdot m_2}, \text{ avec :}$$

- T_i : température du corps i (K)
- C_{pi} : capacité thermique massique du corps i (J/K/kg)
- m_i : masse du corps i (kg)

Cette méthode permet de calculer théoriquement la température d'équilibre mais pas la durée pour l'atteindre. Dans le cas d'un milieu ouvert (air ambiant) le volume d'air est quasi infini (m_2 devient infini) et l'équation ne permet pas de calculer quoique se soit.

Calcul absurde

Ainsi si on considère un labo de 32 m³ à 20 °C (air) et un liquide (eau) de 20 litres à 100 °C (on ne considère pas la cuve inox, ni les murs, le sol ou le plafond du labo), le calcul donne une température d'équilibre de 77 °C. Ce qui signifie que l'équilibre atteint l'eau sera à 77 °C, mais l'air de la pièce aussi ! Dans la réalité on attend bien 20 °C d'équilibre et en moins de 24 heures : le labo n'est pas hermétique (heureusement) et l'air va se charger en humidité qui va changer la conduction de celle-ci.

On a :

$T_{\text{eau}} = 100 \text{ °C}$, soit 373,15 K	$T_{\text{air}} = 20 \text{ °C}$, soit 293,15 K
$V_{\text{eau}} = 0,02 \text{ m}^3$	$m_{\text{air}} = 30 \text{ m}^3$
$C_{p\text{eau}} = 4\,850 \text{ J/K/kg}$	$C_{p\text{air}} = 1\,010 \text{ J/K/kg}$

D'où :

$M_{\text{eau}} = 19,94 \text{ kg}$	$M_{\text{air}} = 38,53 \text{ kg}$
-------------------------------------	-------------------------------------

Et :

$$T_E = \frac{373,15 \cdot 4850 \cdot 19,94 + 293,15 \cdot 1010 \cdot 38,53}{4850 \cdot 19,94 + 1010 \cdot 38,53}$$

$$T_E = 350,2 \text{ K}, \text{ soit } 77 \text{ °C}$$

Indications

Toutefois ce modèle simple permet déjà de déduire quelques éléments pratiques :

- Pour un refroidissement optimal il faut plonger le moût dans un milieu
 - ambiant froid ;

- d'une masse importante ;
- ayant une capacité thermique forte (ce n'est pas le cas de l'air) ;
- et turbulent (pour homogénéiser rapidement).
- Du coup on conçoit bien que l'air ambiant n'a pas une masse extraordinaire, ni une capacité thermique élevée ; tandis que de l'eau froide c'est beaucoup mieux (masse volumique plus importante, capacité thermique plus importante) ; et encore mieux si on la brasse.

17.2.d. Refroidissement (base)

Le calcul de la durée d'atteinte de cet équilibre peut se réaliser à l'aide de la loi de refroidissement de Newton, qui donne :

$$T = T_0 \cdot e^{-k \cdot t} + T_A$$
 , avec :

- t : temps (secondes) ; t=0 au départ de l'expérience
- T(t) : température (K) du corps étudié au temps t
- T(0) : température (K) initiale du corps à t=0
- TA : température ambiante dans laquelle est plongée le corps
- k : le coefficient de refroidissement du corps dans le milieu ambiant (déterminé expérimentalement) par mesure : il faut mesurer la température du liquide à 2 moments t0 et t1)

Mais la loi de Newton a quelques inconvénients majeurs :

- Elle ne concerne qu'un corps simple plongé dans un milieu ambiant homogène (notre moût dans sa cuve le tout dans l'air du labo ne correspond pas vraiment à ce postulat) ;
- Le paramètre k a une influence majeure et il doit être déterminé par mesure expérimentale ;
- Le phénomène étant exponentiel, la température finale de refroidissement n'est jamais « théoriquement » atteinte (plus le temps passe plus la température T du corps tend avec TA mais n'y arrive jamais, il faut stopper les calculs quand TA-T est inférieur à un seuil que l'on se fixe, par exemple 0,5).

17.3. Principales caractéristiques thermiques des matériaux

Flux thermique

Exprime la vitesse de transmission d'une énergie thermique : $f = \frac{Q}{\Delta t}$, avec :

Q : énergie thermique (J) et Δt : durée (s)

Capacité thermique massique

Symbole : c ou Cp / Unité : J.K⁻¹.kg⁻¹ / Référence : [wikipédia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Chaleur_sp%C3%A9cifique)

Anciennement appelée chaleur massique ou chaleur spécifique (*specific heat*).

C'est la capacité thermique d'un matériau rapporté à sa masse. Cette grandeur reflète la **capacité d'un bloc homogène du matériau à accumuler de l'énergie sous forme thermique** pour une masse donnée, lorsque sa température augmente. Une grande capacité thermique massique signifie qu'une grande quantité d'énergie peut être stockée, avec une augmentation relative faible de la température.

C'est défini comme l'énergie qu'il faut apporter pour élever 1 kg de ce matériau d'un degré (Kelvin). Les valeurs fortes ont donc une bonne capacité de stockage.

Tableau 14: Capacité thermique massique de quelques éléments

Matière	Air (sec)	Air (saturé en vapeur)	Eau (liquide)	Moût (d=1,050)	Aluminium	Éthanol	Inox
Cp (J/K/kg)	1005	1030	4185	3860	897	2460	502

Bien que la plus usitée, la capacité thermique massique a des mesures liées directement entre elles :

- Capacité thermique ([wikipédia](#)), c'est la capacité thermique intrinsèque d'une matière (sans lien avec sa masse)
- Capacité thermique molaire ([wikipédia](#)), c'est la capacité thermique d'une matière rapportée à son volume

Conductivité thermique

Symbole : K, k ou λ / Unité : $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ / Référence : [wikipédia](#)

Caractérise le comportement d'un matériau lors du transfert thermique par conduction (contact atomique). C'est la **capacité de transfert d'un gradient de chaleur** (énergie) sans transfert de matière. C'est l'énergie transférée par unité de longueur pour 1 degré d'élévation.

Plus la conductivité est élevée, plus le matériau transmet la chaleur facilement. Et inversement une conductivité faible indique un isolant thermique.

C'est ce qui explique la sensation de « froid » par contact du carrelage ou des métaux par exemple : ils sont généralement à température ambiante (20 à 25 °C) et notre corps à 37 °C. Du fait de leur forte conductivité ces matières « pompent » rapidement de la chaleur à notre corps et nous ressentons une sensation froide (perte de chaleur). Et inversement on se brûle plus facilement avec un métal chaud qu'avec de l'eau à même température. L'air transmet mal la chaleur, d'où la possibilité de mettre sa main dans l'air d'un four chaud (temporairement).

Tableau 15: Conductivité thermique des quelques éléments

Matière (20 °C)	Air (sec)	Liège	Bois	Laine de roche / Paille	Eau (liquide)	Inox	Aluminium	Cuivre
K (W/m/K)	0,0262	0,04	0,2	0,4	0,565	26	237	390
Remarque	Très isolant	Isolant	Isolant	Isolant		Conducteur	Très conducteur	

Diffusivité thermique

Symbole : D / Unité : $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ / Référence : [wikipédia](#)

Caractérise la capacité d'un matériau à transmettre un signal de température ; soit à transmettre un écart de température reçu à un autre matériau contigu. C'est la rapidité à laquelle un matériau transmet de l'énergie thermique. La diffusivité dépend à la fois de la capacité thermique massique et de la conductivité du matériau.

$$D = \frac{K}{d \times c} \quad , \text{ avec :}$$

- K : Conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
- d : masse volumique (kg.m^{-3})
- c : capacité thermique massique ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

Effusivité thermique

Symbole : E / unité : $\text{J.K}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$ / Référence : [wikipédia](#)

Caractérise sa capacité à échanger de l'énergie thermique avec son environnement. C'est la rapidité à laquelle un matériau absorbe de l'énergie thermique. L'effusivité dépend de la conductivité thermique et de la capacité thermique massique du matériau. Une effusivité élevée indique que le matériau absorbe l'énergie sans trop s'échauffer lui-même et donne une sensation agréable au toucher.

$$E = \sqrt{K \times \rho \times c} \quad , \text{ avec :}$$

- K : Conductivité thermique (W/m/K)
- ρ : masse volumique (kg/m^3)
- c : capacité thermique massique (J/kg/K)

Résistance thermique

Symbole : R / Unité : K.W⁻¹ / Référence : [wikipédia](#)

C'est la capacité d'un matériau à résister à un flux thermique. Selon le mode de transfert on peut distinguer la résistance de convection et la résistance de conduction. Très utilisé pour les surfaces planes dans l'isolation des bâtiments. L'inverse est la conductance thermique.

$$R = \frac{e}{K \times S}, \text{ avec :}$$

- e : épaisseur du matériau (m)
- S : surface du matériau (m²)
- K : Conductivité thermique (W/m/K)

Inertie thermique

Référence : [wikipédia](#)

L'inertie thermique d'un matériau représente sa résistance au changement de température lorsque intervient une perturbation thermique. L'inertie n'est pas une mesure, elle est quantifiée par les grandeurs vues ci-dessus :

- Diffusivité thermique (D) ;
- Épaisseur du matériau (e), le temps de déphasage thermique est de l'ordre de $\frac{e^2}{D}$;
- Effusivité thermique (E).

17.4. Thermodynamique des liquides

A développer

17.5. Thermodynamique des gaz

A développer

17.5.a. Gaz parfaits

Référence : [Wikipedia](#)

Le **gaz parfait** est un modèle thermodynamique décrivant le comportement des gaz réels à basse pression.

Ce modèle a été développé du milieu du XVII^e siècle au milieu du XVIII^e siècle et formalisé au XIX^e siècle. Il est fondé sur l'observation expérimentale selon laquelle tous les gaz tendent vers ce comportement à pression suffisamment basse, quelle que soit la nature chimique du gaz, ce qu'exprime la loi d'Avogadro, énoncée en 1811. Cette propriété s'explique par le fait que lorsque la pression est faible, les molécules de gaz sont suffisamment éloignées les unes des autres pour que l'on puisse négliger les interactions électrostatiques qui dépendent, elles, de la nature du gaz (molécules plus ou moins polaires). En fixant le domaine des basses pressions, on suppose donc que les interactions moléculaires sont assimilable à ces chocs élastiques. De nombreux gaz réels vérifient avec une excellente approximation le modèle du gaz parfait dans les conditions normales. C'est le cas des gaz principaux de l'air.

17.5.b. Équation d'état des gaz parfaits

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Avec :

- P (Pa), pression du gaz
- V (m³), volume occupé par le gaz
- n (mole), la quantité de matière (nombre de mole du gaz)
- R (J.mol⁻¹.K⁻¹), constante universelle des gaz parfaits
- T (K) température absolue

Cette équation dérive d'autres lois plus anciennes, ci-dessous.

Avec la loi de Dalton (pression partielle) et les propriétés strictement additives des gaz parfaits on peut exprimer l'équation d'état d'un mélange de gaz parfaits :

$$P \cdot V = \sum_i n_i \cdot R \cdot T$$

Constante universelle des gaz parfaits

https://fr.wikipedia.org/wiki/Constante_universelle_des_gaz_parfaits

Cette constante, notée R est le produit du nombre d'Avogadro (N_A) et de la constante de Boltzmann (k_B).

Ce produit vaut exactement : $R = 8,314\,462\,618\,153\,24\,J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$. Elle a été empiriquement développée comme constante de proportionnalité pour l'équation des gaz parfaits.

Loi d'Avogadro

https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_d%27Avogadro

Des volumes égaux de gaz parfaits différents, aux mêmes conditions de température et de pression, contiennent le même nombre de molécules. Leur volume molaire est identique.

On peut aussi l'exprimer : $\frac{V_1}{n_1} = \frac{V_2}{n_2}$

À partir de l'équation des gaz parfaits on a : $V = \frac{n \cdot R \cdot T}{P}$. Si on ramène à 1 mole ($n=1$) on a alors le

volume molaire : $V_m = \frac{R \cdot T}{P}$, qui ne dépend que de la température et la pression.

Loi de Boyle-Mariotte

https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Boyle-Mariotte

Établi un lien entre la pression et la température d'un gaz parfait à température constante. Ainsi à température constante l'augmentation du volume entraîne une baisse de la pression.

Pour une même quantité de gaz dans 2 états 1 et 2, on a : $P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$

Loi de Charles

https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Charles

À pression constante, le volume d'un gaz parfait est directement proportionnel à la température absolue.

Soit : $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$.

Loi de Gay-Lussac

https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Gay-Lussac

À volume V constant, la pression d'un gaz parfait est directement proportionnel à la température absolue.

Soit pour une même quantité de gaz dans les états 1 et 2 : $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$

17.5.c. Mélange de gaz parfaits

Pressions partielles (loi de Dalton)

https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Dalton

La pression au sens d'un mélange de gaz parfaits est la somme des pressions partielles de chaque gaz le composant. La pression étant directement liée au nombre de molécules (et à la température absolue), et le volume molaire étant constant pour un gaz parfait ; on a alors la loi de Dalton qui s'impose.

$$P = \sum_i P_i$$

Volumes partiels (loi d'Amagat)

https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_d%27Amagat

Valable pour les basses pressions et pour les gaz parfaits

$$V = \sum_i V_i$$

17.5.d. Solubilité du CO₂ (gaz) dans la bière (eau)

Ce chapitre s'intéresse à la solubilité du CO₂ dans la bière, toutefois nous exploitons ici des approximations (gaz parfaits) et considérons la bière comme de l'eau alors qu'il s'agit plutôt d'une solution d'éthanol dans de l'eau.

A développer

Loi de Henry (pression et gaz dissous)

Référence : [wikipédia](#), [aquatech](#) & [copernicus](#)

En physique, et plus particulièrement en thermodynamique, la loi de Henry énonce que :

« À température constante et à saturation, la quantité de gaz dissout dans un liquide est proportionnelle à la pression partielle qu'exerce ce gaz sur le liquide. ». Cette loi a été établie empiriquement par le physicien britannique *William Henry* en 1803.

Elle s'exprime donc ainsi : $P_{E(g)} = K_H \cdot X_{E(aq)}$

Elle permet notamment de calculer les équilibres liquide-vapeur des solutions dont la phase vapeur est un mélange de gaz parfaits. Elle est utilisée dans de nombreux domaines de la chimie, de la physique, de la météorologie et des boissons gazeuses. C'est ce dernier domaine qui nous intéressera.

La loi de Henry a évolué depuis son origine, là où plutôt les constantes K_H ont été définies empiriquement (par expérience) suivant plusieurs modèles. Il est important de bien les comprendre et utiliser une notation précise afin de s'y retrouver. Ces constantes sont définies pour un soluté (ex. CO₂) dans un solvant (ex. Eau) pour une température (T), à une pression faible (moins de 10 bars) et pour fraction molaire inférieure à 0,05.

Les modèles existants se basent sur la manière de mesurer l'élément E, on a :

- P_E (atm), la pression partielle de l'élément E
- $X_{E(aq)}$ (sans unité ou %) la fraction molaire liquide de l'élément E
- $X_{E(g)}$ (sans unité ou %) la fraction molaire gazeuse de l'élément E
- $C_{E(aq)}$ (mol/L) la concentration de l'élément E en phase aqueuse (dans la liquide)
- $C_{E(g)}$ (mol/L) la concentration de l'élément E en phase gazeuse (dans l'espace de tête de la bouteille)

Historiquement la première constante de Henry K_H ou plus précisément $K_{H,p/x}$ indique la constante liant la pression (p) à la fraction molaire (x), on a donc $P_{E(aq)} = K_{H,p/x} \cdot X_{E(aq)}$, avec P_E la pression partielle liquide E et X_E sa fraction molaire liquide (mol/L).

Symbole normalisé	Symbole courant	Numérateur	Dénominateur	Unité	Formulation
$K_{H,p/x}$	K_H	Pression (atm)	Fraction molaire liquide (%)	atm	$P_{E(aq)} = K_{H,p/x} \cdot X_{E(aq)}$
$K_{H,p/c}$		Pression (atm)	Concentration liquide (mol/L)	mol/L/atm	$P_{E(aq)} = K_{H,p/c} \cdot C_{E(aq)}$
$K_{H,c/p}$	K	Concentration liquide (mol/L)	Pression (atm)	atm/mol/L	$C_{E(aq)} = K_{H,c/p} \cdot P_E$

$K_{H,c/c}$	H	Concentration liquide (mol/L)	Concentration gazeuse (mol/L)	sans	$C_{E(aq)} = K_{H,c/c} \cdot C_{E(g)}$
-------------	---	-------------------------------	-------------------------------	------	--

Pression partielle

La pression partielle d'un gaz dans un mélange est la portion de pression totale que représente ce gaz si il était seul. Cette pression partielle est proportionnelle à la fraction molaire de ce gaz dans l'ensemble.

On a $P_E = X_E \cdot P$.

La loi de Henry permet d'en déduire la pression partielle du soluté m dans le solvant étudié :

$$P_E = X_{E(aq)} \cdot K_{H,p/x}^{E,s}, \text{ avec :}$$

- P , pression totale du mélange
- P_m , pression partielle du soluté m, par définition $P_m = x_m^g \cdot P$ soit la fraction molaire du soluté m par rapport à la pression totale.
- $k_{H,m,s}$, la constante de Henry du soluté E dans le solvant s, aux pressions P et température T du mélange et $H = \frac{1}{K_H}$
- x_m^g , la fraction molaire du soluté m en phase vapeur (gaz)
- x_m^{aq} , la fraction molaire du soluté m en phase liquide (aqueux)

Constante de Henry pour la dissolution du CO₂ dans l'eau.

Équation pour l'eau	T	$H_{cp} = \frac{C_{CO2}^{liquide}}{P}$	$K_H^{px} = \frac{P}{x}$	$H_{cc} = \frac{C_{CO2}^{liquide}}{C_{CO2}^{gaz}}$
Unité	°C	mol.l ⁻¹ .atm ⁻¹	atm	-
Dioxygène de Carbone (CO ₂)	0		70	
	10		100	
	20		142	
	25	0,034	1630	0,8317
	32		200	
	42		250	
	50		300	
	50		456	

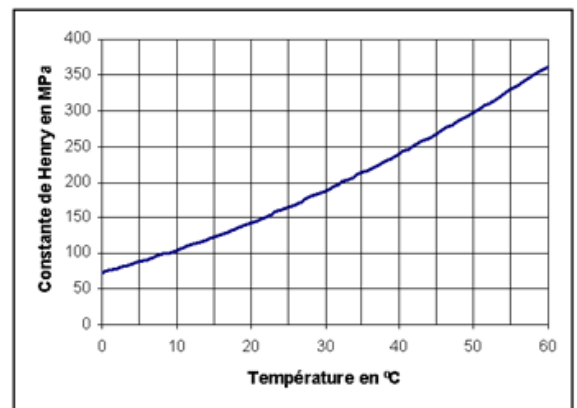


Figure 23: Constante de Henry : CO₂ dans l'eau

Où P la pression (atm) ; C_{CO2}^{gaz} la concentration molaire du gaz en phase gazeuse (mol/l) et x la fraction molaire du composé en solution aqueuse (sans dimension).

Pour un gaz parfait on a $H_{cc} = \frac{C_{CO2}^{liquide}}{C_{CO2}^{gaz}} = R \cdot T \cdot H_{cp}$ et $H_{cp} = \frac{C_{CO2}^{liquide}}{P}$

A compléter.

https://gaz.wiki/wiki/fr/Henry%27s_law

17.6. Pression de vapeur saturante (évaporation-condensation)

Référence : [wikipédia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pression_de_vapeur_saturante)

Les phénomènes de variation de température (chauffe ou refroidissement) d'une liquide dans un milieu gazeux (moût dans l'air ambiant par exemple) nécessite d'introduire la notion de pression de vapeur saturante. C'est la pression à laquelle la phase gazeuse d'une substance est en équilibre avec sa phase liquide à une température donnée dans un système fermé. L'équilibre parfait est atteint, dans les conditions normales, au point d'ébullition de la phase liquide.

Le ratio $\frac{P_{sat}}{P}$ représente le degré d'évaporation (si négatif c'est le degré de condensation).

Lorsqu'une substance a une pression de vapeur saturante élevée (par rapport à la pression ambiante), elle est dite « volatile » car son évaporation est favorisée. La pression de vapeur saturante augmente avec la température de manière non linéaire et selon la formule de *Clausius-Claperton*. Son effet est variable selon la pression partielle de vapeur : pression que l'élément étudié (souvent l'eau) a dans la pression du milieu (souvent l'air).

- Pression vapeur < pression saturante : il y a forte évaporation de la phase liquide ;
- Pression vapeur > pression saturante : il y a forte condensation de la phase gazeuse.

La pression de vapeur saturante correspond aussi à la pente du [diagramme de phase](#) de la substance.

Pour de l'eau et les températures « normales » (5 à 140 °C) on peut utiliser la formule de *Rankine* ([wikipédia](#)) pour obtenir une approximation de la pression de vapeur saturante de l'air, soit :

$$P_{sat} = P_0 \times e^{\frac{13,7 - \frac{5120}{T}}{}} \quad (\text{figure 24})$$

Avec T en Kelvin et P en atm (P₀ la pression atmosphérique).

Cette formule est une simplification des formules de *Clausius-Clapeyron*.

La pression de vapeur saturante est donc croissante avec l'élévation de la température (l'air chaud peut absorber plus d'eau que l'air froid). C'est ce qui explique la buée sur les vitres en hiver : l'air chaud de la maison, s'il est chargé en humidité, peut au contact du froid des vitres, se refroidir et provoquer la condensation de l'eau contenue dans l'air.

Température saturante (T_{sat}), c'est la température de saturation pour une pression P donnée, c'est aussi la température d'ébullition.

Humidité relative (hygrométrie)

C'est le rapport entre la pression partielle de l'eau dans l'air et la pression de vapeur saturante à la même température. C'est aussi le ratio de la quantité d'eau contenu dans l'air sur la capacité maximale d'absorption d'eau par l'air dans les conditions courantes. Ainsi 100 % d'humidité relative indique que l'air est saturé et ne pourra en absorber d'autre, sauf si les conditions (température ou pression) changent.

$$\varphi (\%) = \frac{P_{vap}}{P_{sat}(T)} \times 100$$

Point de rosée

Le **point de rosée** est la température à laquelle l'air ambiant est saturé en eau (humidité relative = 100 %). À partir de cette température l'eau ne peut plus s'évaporer, l'air ne peut plus absorber d'eau supplémentaire. Les phénomènes de condensation (dont la pluie ou la buée) s'amorcent (l'eau quitte l'air, si on peut dire).

Le point de rosée est donc la température correspondant à la pression de vapeur saturante courante.

Pression de vapeur saturante pour l'eau

Formule de Rankine (valable de 5 à 140 °C)

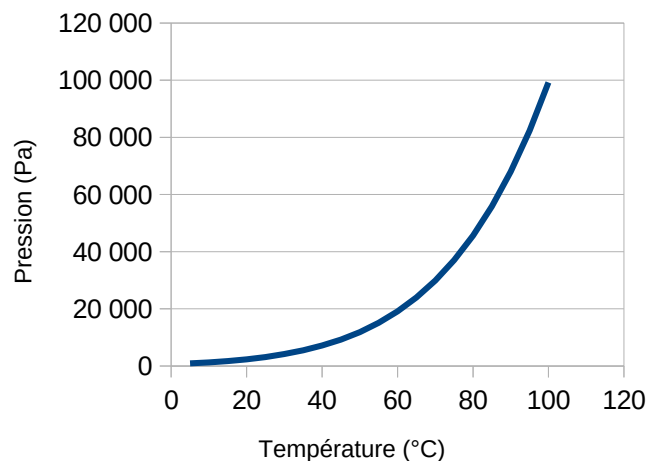


Figure 24: Pression de vapeur saturante de l'eau

17.7. Chauffe

La chauffe consiste à apporter de l'énergie thermique. Dans la cadre du brassage, la chauffe du moût consiste donc à apporter de l'énergie thermique au moût. Cette opération est souvent réalisée par soit un brûleur externe, soit une résistance électrique qui peut être externe ou interne.

Calculs pratiques de chauffe en brassage

Propriétés	Eau	Moût standard (d=1,050)
Masse volumique (kg/m ³ ou g/L)	1000	1050
Capacité thermique massique (J/K/kg)	4185	3860

Puissance de chauffe nécessaire

C'est la puissance (exprimé en Watt) réelle d'une source d'émission d'énergie thermique pour chauffer un élément. Il s'agit d'un calcul approximatif mais qui permet d'évaluer des cas pratique réel sans nécessiter l'utilisation d'un logiciel de thermodynamique.

Énergie nécessaire :
$$Q_{eff} = \frac{M \times C_p \times \Delta T}{n}$$

Avec Q_{eff} : énergie (J) nécessaire pour augmenter la température d'une masse M (kg) et de capacité thermique massique C_p (J/K/kg), d'un écart de température de ΔT (°C ou K) et avec un coefficient d'efficacité du système de chauffe de n (sans unité).

Puissance nécessaire :
$$P_{eff} = \frac{Q_{eff}}{t}$$
, avec P_{eff} puissance (W) pour diffuser une énergie Q_{eff} (J) pendant une durée t (secondes).

Temps nécessaire :
$$t = \frac{\Delta T}{v_t}$$
, avec t : temps (secondes) nécessaire selon l'écart de température ΔT (°C ou K) et la vitesse de variation de la température v_t (K/secondes).

Masse du moût :
$$M = d \times V$$
, avec M : masse (kg) d'une matière de masse volumique d (kg/m³) et d'un volume V (m³).

On peut alors simplifier en :
$$P_{eff} = \frac{d \times V \times v_t \times C_p}{n}$$

Avec :

- P_{eff} : puissance nécessaire (W) ou puissance efficace,
- d : densité du moût (kg/m³ ou g/L), soit selon la recette de 1,040 à 1,100 environ,
- V : volume du moût à chauffer (m³),
- v_t : vitesse de chauffe (K/s), dans la littérature du brassage il est recommandé 1 K/minute, soit 0,0167 K/s ; il est prudent de prendre un coefficient de sécurité de 2, soit 0,0333 K/s (on peut baisser la puissance maximale, on ne peut pas la monter), surtout si l'on veut mettre à bouillir de l'eau.
- C_p : capacité thermique massique du liquide (J/K/kg)
- n : rendement du transfert d'énergie, estimation qui prend en compte le type de chauffage et les pertes associées.
 - Brûleur gaz : $n=0,5$;
 - Résistance électrique plongée dans l'eau : $n=1,0$ (pas de pertes) ;
 - Plaque électrique : $n=0,75$.

On obtient par exemple, pour porter un volume (V) de 50 litres de moût (densité 1 050 kg/m³ et $C_p=3\,860$ J/K/kg) à ébullition (de 20 à 100 °C, soit $\Delta T=80$) à la vitesse de $v_t=2$ K / minute (soit 0,033 K/s) : il faut un brûleur gaz d'une puissance minimale de 13 537 W.

$$P_{eff} = \frac{0,05 \times 1050 \times 0,033 \times 3860}{0,5} = 13537 \text{ W} , \text{ soit une puissance minimale de } 13,5 \text{ kW}$$

Temps de chauffe

Par réciproque, on peut calculer le temps de chauffe si on connaît la puissance de chauffe.

$$t = \frac{d \times V \times C_p \times dT}{P_{eff} \times n} \quad \text{en respectant les unités bien sur, on obtient } t \text{ (secondes) le temps pour chauffer de}$$

dT (°C) la matière de masse volumique d (kg/m³) et volume V (m³) et capacité thermique massique C_p (J/K/kg) avec un système de chauffe de puissance P (W) et de rendement n .

Soit avec un brûleur gaz de 10 kW (10 000 W) de rendement 0,5 on peut mettre à ébullition (de 20 à 100 °C) un volume de 50 litres (0,05 m³) d'eau (densité 1 000 kg/m³ et chaleur massique de 4 185 J/K/kg), soit :

$$t = \frac{1000 \times 0,05 \times 4185 \times 80}{10000 \times 0,5} = 3348 \text{ secondes} , \text{ soit environ } 56 \text{ minutes.}$$

17.8. Refroidissement

C'est le symétrique de la chauffe, il s'agit de retirer de l'énergie thermique. Dans le cadre du brassage le refroidissement intervient à 2 étapes :

- Refroidissement après la cuisson (c'est le principal)
- Maintien température de fermentation (pendant la fermentation)

Dans les 2 cas, le moût est dans un contenant généralement fermé (pour sa protection contre les contaminations) et dans un milieu ambiant (celui de l'atelier de brassage).

Les contraintes sont donc :

- Protéger le moût (pour cela on utilisera un contenu propre et fermé) ;
- Optimiser les conditions pour réduire la durée de refroidissement.

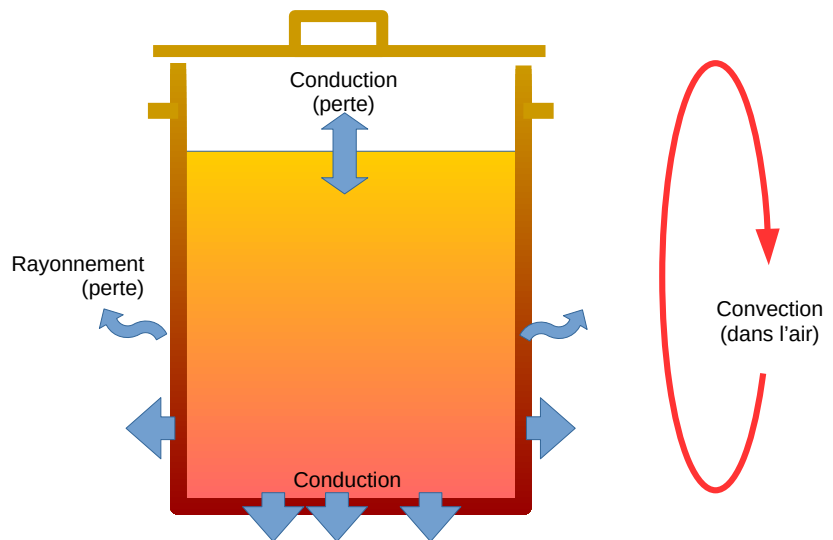


Figure 25: Refroidissement

D'un point de vue thermodynamique le refroidissement du moût va se produire par l'échange de chaleur (énergie) que le moût va avoir avec le milieu, c'est le phénomène d'**équilibre thermique**.

Le moût est dans un contenu qui est lui-même en contact avec l'air et la surface sur laquelle il est posé.

D'autre part l'**évaporation** peut aussi permettre de refroidir, mais dans le cas du brassage on ne peut l'utiliser que pendant les débuts du refroidissement à cause des risques de contamination au-dessous de 75 °C.

Si l'air ambiant est turbulent, c'est mieux, car cela favorise le renouvellement de la couche d'air chaud qui entoure la cuve (on provoque ainsi un phénomène de convection).

C'est aussi pourquoi on peut plonger la marmite dans un grand volume d'eau fraîche pour refroidir plus vite/ L'eau est plus conducteur et fait un meilleur réservoir d'énergie que l'air.

17.9. Ébullition

Référence : [wikipédia](#)

L'ébullition est la formation de bulles de gaz lors du changement violent de l'état liquide à l'état gazeux, qui se produit lorsque la pression de la vapeur saturante est supérieure à la pression du liquide.

La température où se produit le phénomène dépend de la température d'ébullition de la solution et de la pression atmosphérique. Les bulles se forment mieux sur de microscopiques aspérités.

La formation de bulles est très difficile, car la tension de surface entre la phase liquide et gazeuses engendre de très forte pression. Toutefois le liquide n'est jamais totalement pur (contient d'autres éléments même petit) et le contenant jamais totalement lisse (aspérités) ; ce qui permet la formation plus facile de bulles de gaz : ce sont des **sites de nucléation**. Le phénomène est similaire à la formation des bulles de CO₂ à l'ouverture d'une bouteille de bière.

Une fois une bulle formée, il est plus facile (en termes d'énergie) de faire grossir la bulle que d'en créer une nouvelle. Toutefois à partir d'une certaine taille, la bulle est entraînée vers le haut (la bulle de vapeur d'eau est plus légère que l'eau liquide et l'effet de la gravitation et le principe d'Archimède va l'amener à flotter puis s'éloigner du centre de gravitation). Elle va rejoindre la surface et disparaître dans l'air.

À partir du point d'ébullition, tout apport d'énergie supplémentaire ne va plus augmenter la température du liquide, mais sera intégralement converti en énergie pour le changement de phase du liquide (devenir du gaz, de la vapeur d'eau).

Dans le cadre du brassage, la cuisson est recommandée a gros bouillon, ce n'est pas pour chauffer plus mais pour évaporer plus.

L'ébullition est simultanée avec le phénomène d'évaporation (mais pas l'inverse), c'est un phénomène similaire (changement d'état de liquide à gazeux). Mais l'ébullition est un phénomène très rapide et violent, qui se produit en contact avec le contenant alors que l'évaporation se produit en surface et est un phénomène très lent (voir chapitre suivant).

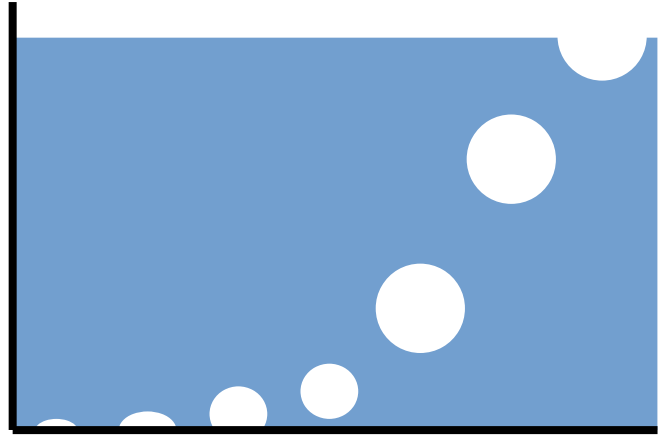


Figure 26: Étapes de la formation d'une bulle de vapeur d'eau

Surpression et altitude

Si on maintient une surpression (par exemple avec un autocuiseur) on peut porter de l'eau à 120 °C. L'autocuiseur étant hermétique (avec une soupape qui maintient une surpression) on augmente la pression ; ce qui permet d'élever la température d'ébullition.

Inversement, en altitude la pression atmosphérique diminue, cette variation de pression a un effet notable sur le point d'ébullition notamment, car celui-ci dépend de la pression de vapeur saturante.

La pression de l'air est de 101 325 Pa au niveau de la mer, c'est la pression de référence (voir paragraphe [pression](#)).

Effet de l'altitude sur la pression :
$$P = 101325 \times \left(\frac{288,15 - 0,0065 \times h}{288,15} \right)^{5,255}$$
 avec h l'altitude (m).

Effet de la pression sur le point d'ébullition de l'eau :
$$T_{\text{ébullition}} = 26,307 \times \ln(P) + 69,771$$

Ainsi si vous brassez à 2000 mètres d'altitude, la pression atmosphérique sera de 89 876 Pa et la température d'ébullition de l'eau sera alors de 96,6 °C.

17.10. Évaporation et dissolution/condensation

Référence : [wikipédia](#)

L'évaporation est un phénomène physique de passage lent et progressif d'un état liquide à un état gazeux. Ce changement d'état a pour effet collatéral d'absorber de l'énergie thermique dans le liquide et donc de réduire la température de celui-ci. La condensation (ou dissolution) est le phénomène inverse. C'est un phénomène moléculaire.

Les 2 phénomènes se déroulent en même temps dans les 2 sens, jusqu'à un état d'équilibre entre les phases gazeuses et liquide. Cet équilibre dépend des gaz, du liquide et des conditions de pression et de température notamment.

17.10.a. Phénomène moléculaire

Sous l'effet de la chaleur l'agitation moléculaire du liquide augmente entraînant l'expulsion de molécules du liquide à un taux proportionnel à l'agitation (donc à la chaleur). Ces molécules projetées y resteront suivant la quantité de liquide déjà présent dans l'air, la limite étant la pression de vapeur saturante de l'air (au-delà que cette pression l'eau redevient liquide, il y a condensation). L'interface entre le milieu liquide et le milieu ambiant gazeux est appelé « *couche de Kudsén* » et c'est là que se produisent les échanges entre la phase liquide et gazeuse de la substance. Ce phénomène de changement de phase se produit en permanence dans les 2 sens (évaporation et condensation), le rythme de chacun d'eux change suivant les conditions de pression et température.

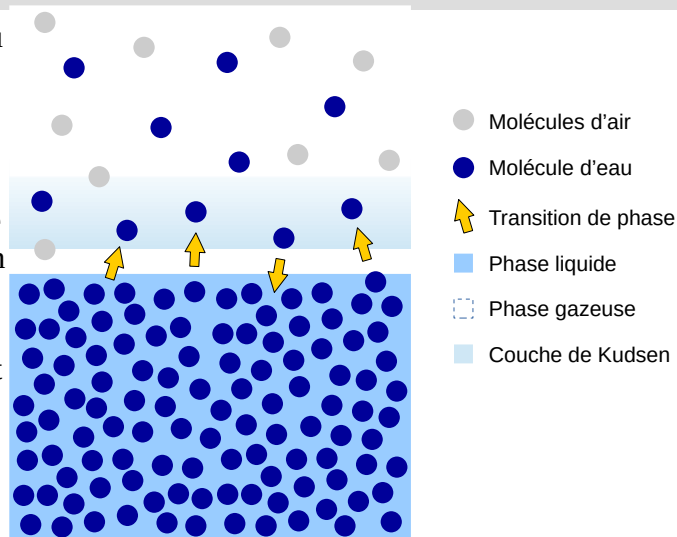


Figure 27: Processus microscopique d'évaporation et de condensation

17.10.b. Phénomène thermique

Diagramme de phase de l'eau

La projection des molécules d'eau nécessite une énergie cinétique, celle-ci est « prise » dans l'énergie thermique de la masse d'origine, c'est pourquoi l'évaporation refroidit la masse d'origine. Plus précisément l'agitation moléculaire est déjà une forme d'énergie cinétique mais qui reste dans le bloc plus ou moins homogène (la substance). Lorsque la molécule quitte le bloc homogène cette énergie cinétique est perdue pour la substance et passe dans la phase gazeuse. C'est cette perte qui occasionne une réduction de l'énergie globale de la substance liquide et donc son refroidissement.

Dans le cas de l'eau pure, il faut 2400 joules à 25 °C pour évaporer 1 gramme d'eau, soit la même énergie que pour élever 580 grammes d'eau de 1 °C, c'est donc un effet très significatif.

C'est un changement de phase qui se produit lorsque la substance passe de la phase liquide à la phase gazeuse (et réciproquement). Sur le diagramme de phase de la substance, c'est l'interface de la courbe entre l'état liquide et gazeux. Il dépend donc de la température et de la pression (pression partielle pour les gaz). Ainsi à la surface de l'eau c'est la différence de pression entre l'eau liquide et la part d'eau gazeuse dans l'air, qui va engendrer l'évaporation. L'air contenant plus d'eau lorsqu'il est chaud va engendrer plus d'évaporation. Le taux d'évaporation est donc très dépendant de l'humidité relative de l'air qui est maximale à la pression de vapeur saturante.

Masse couverte

Il est plus facile de porter à ébullition une masse d'eau fermée (couvercle) que dans un milieu ouvert (sans couvercle). La couverture de la masse permet de réduire l'évaporation (en maintenant un air saturé) ce qui évite une perte importante d'énergie thermique et donc une meilleure efficacité de l'échauffement.

Avec un couvercle l'évaporation est limitée par 2 facteurs :

- L'air dans le contenant se charge en eau et ne plus en absorber d'autre (air saturé) ;
- Et se forme sur le couvercle (en contact avec l'air froid extérieur) une condensation qui occasionne une « pluie » (condensation) qui retombe dans la masse liquide.

Les pertes d'énergie sont donc fortement diminuées.

17.10.c. Taux d'évaporation

Le taux d'évaporation c'est une mesure de la quantité de liquide évaporé rapporté à la quantité initiale (un pourcentage), c'est qui va nous intéresser lors de la cuisson du moût pour évaluer les volumes.

Le taux d'évaporation est proportionnelle à la température du liquide, à la pression en vapeur d'eau de l'air ambiant et à la surface libre d'échange ; ainsi :

- Plus la température du liquide est importante plus il y aura d'évaporation (agitation moléculaire) ;
- Plus le milieu ambiant sera « sec », grand et turbulent (renouvellement de l'air de la couche de *Kudsen*) plus l'évaporation sera élevée. Soit un atelier volumineux et ventilé ;
- Plus la surface libre du liquide sera importante, plus le taux d'évaporation sera important ; une eau agitée (ébullition vigoureuse) augmente sa surface libre. Une petite gouttelette d'eau s'évapore vite (rapport surface/volume important).

L'état de stabilité non évaporant peut-être atteint lorsque le milieu ambiant est saturé en eau, sachant que la saturation en eau de l'air est variable suivant la température.

17.10.d. Évaporations naturelles

L'évaporation la plus facilement visible et expérimentable est celle qui se produit dans nos casseroles lors de la cuisson et ébullition de l'eau. C'est celle que nous rencontrons lors du brassage. Elle est visible, car il s'échappe beaucoup de vapeur d'eau lors de l'ébullition.

Toutefois le phénomène d'évaporation se produit en permanence et à toute température, tant que l'on est pas dans un état d'équilibre entre les phases liquide et gazeuse.

Ainsi l'eau d'un étang, d'une rivière ou d'une piscine s'évapore en permanence, mais généralement a un rythme faible et rarement visible. Ainsi la brume qui se forme au petit matin froid est en partie liée à l'évaporation de l'eau. L'air froid se charge en humidité par l'évaporation de l'eau (qui a lieu même a un rythme faible). Cet air étant froid la pression de vapeur saturante est basse et le phénomène de condensation peut se produire facilement, notamment si l'air est chargé en particules favorisant la nucléation de l'eau et si le temps est peu turbulent. Se forme alors dans l'air humide, de fines gouttelettes d'eau qui sont alors visibles (brume), la condensation de l'eau évaporée.

La transpiration animale ou végétale (évapotranspiration) est aussi un phénomène lié à l'évaporation, l'eau (chaude) qui perle à la surface de notre peau évacue un peu de chaleur et s'évapore au contact de l'air ambiant et refroidit ainsi la peau. C'est aussi ce qui explique qu'un ventilateur (qui brasse de l'air chaud) nous refroidit, car il renouvelle l'air de la couche de *Kudsen* qui enveloppe notre peau libre et évacue l'air chargée en humidité améliorant ainsi le taux d'évaporation et donc le refroidissement de notre corps.

Les cruches en terre permettent aussi de rafraîchir de l'eau de par leur légère perméabilité qui permet à l'eau contenue de s'infiltrer dans la cruche et les micro-gouttelettes arrivant sur la surface extérieure s'évapore de suite ce qui pompe de l'énergie thermique et refroidit l'eau contenue. Ici c'est le rapport important entre la surface des gouttelettes et leur volume qui permet une évaporation importante. Phénomène de refroidissement similaire à celui qui permet de rafraîchir par vaporisation d'eau.

17.10.e. Application au brassage (optimisation de la chauffe)

Un cas courant est celui du moût dans l'air ambiant et notamment lors des étapes de cuisson, afin d'optimiser l'énergie nécessaire.

Dans ce cas on a donc notre substance (moût assimilable à de l'eau) dans une cuve chauffée avec ou sans couvercle et plongé dans l'air ambiant. Quelques cas intéressants :

- Cuve chauffée avec couvercle : on conçoit alors que l'air ambiant est celui compris dans la cuve entre le liquide et le couvercle. Ce dernier va se charger rapidement (le volume étant faible) en eau évaporée (vapeur) pour atteindre rapidement la pression de vapeur saturante. Une fois atteint, l'eau va se condenser (revenir à l'état liquide, l'air ne pouvant plus « supporter » cette vapeur). C'est ce que l'on constate en soulevant le couvercle ou l'on voit de l'eau retomber dans le moût.

Dans ce cas il n'y a guère d'évaporation. Cette situation permet d'accélérer la chauffe pour atteindre l'ébullition mais ne permet pas une réelle évaporation.

- Cuve chauffée sans couvercle, l'air se sature moins (on dispose de l'espace de l'atelier) et l'évaporation continue. Toutefois au bout d'un moment de l'eau se forme sur les surfaces vitrées de la pièce, car le contact avec le verre plus froid que l'intérieur de la pièce abaisse la pression de vapeur saturante et là aussi la vapeur retourne à l'état liquide. C'est pourquoi il faut aérer la pièce de brassage, ce qui permet d'avoir une évaporation plus efficace et d'éviter d'humidifier les murs de la pièce (ou avoir une bonne VMC).
- Cuve en refroidissement avec couvercle : l'air emprisonné ne permet pas l'évaporation, le refroidissement est plus lent.
- Cuve en refroidissement sans couvercle : l'évaporation peut continuer et contribue à accélérer le refroidissement (l'évaporation pompe de l'énergie thermique). Cela permet d'optimiser le début de refroidissement. Il convient toutefois de remettre un couvercle au-dessous d'une température de l'ordre de 70 à 80 °C, pour éviter toute contamination par une bactérie sauvage de l'environnement.

17.10.f. Calculs

L'état d'équilibre est décrit par la formule de *Randkine* qui provient de l'intégration de l'équation plus complexe de *Clausius-Clapeyron* ([wikipédia](#)), valable pour les gaz parfaits (basse pression) :

$$\ln\left(\frac{P_{sat}}{P_0}\right) = -\frac{\Delta H_{vap}}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_{sat}} - \frac{1}{T_0}\right), \text{ avec :}$$

- P_{sat} , pression saturante à la température T_{sat} du milieu ambiant ;
- P_0 , pression à la température T_0 ;
- ΔH_{vap} , l'énergie de vaporisation, supposé constante ;
- R , la constante des gaz parfaits

Amélioré par *Antoine* ([wikipédia](#)), pour une substance dans l'air ambiant, en :

$$\log_{10}\left(\frac{P_{sat}}{P_0}\right) = A - \frac{B}{T+C}, \text{ avec :}$$

- P_0 , la pression ambiante standard (101 325 Pa)
- T , la température ambiante (K)
- P_{sat} , la pression de vapeur saturante
- A , B et C : les constantes d'Antoine pour la substance considérée

On peut en extraire la température d'ébullition : $T_{sat} = \frac{B}{A - \log_{10}\left(\frac{P}{P_0}\right)} - C$ qui donne la température

saturante (ou point d'ébullition) d'une substance à la pression P .

Antoine a défini (expérimentalement) les constantes A , B et C pour nos 2 substances préférées :

Composé	A	B	C	Température (K)	Température (°C)
Eau	5,40221	1838,675	-31,737	273 à 303	-5 à 30 °C
	5,20389	1733,926	-39,485	304 à 333	30 à 60 °C
	5,0768/0	1659,793	-45,854	334 à 363	60 à 90 °C
	5,08354	1663,125	-45,662	344 à 373	70 à 100 °C
	6,20963	2354,731	7,559	293 à 343	20 à 70 °C
	4,65430	1435,264	-64,848	256 à 373	-17 à 240 °C
Éthanol	4,92531	1432,526	-61,819	365 à 514	90 à 240 °C

Dans le cadre de la cuisson du moût, l'évaporation concerne essentiellement l'eau et elle se produit à la surface libre du moût (couche de *Kudsen*), c'est-à-dire la surface de contact entre le liquide et l'air.

L'intensité du phénomène d'évaporation est lié à la température, à la saturation de l'air et à la surface libre

- Ainsi la température augmente l'évaporation, l'ébullition augmente encore l'évaporation en brassant la surface libre et augmentant la surface d'échange ;
- Le brassage de l'air libre augmente l'évaporation (en réduisant la saturation de l'air), c'est aussi pourquoi l'évaporation est efficace sans couvercle, sinon l'air contenu va vite saturer, d'eau et le phénomène d'évaporation va se réduire ou entrer en cycle (la saturation en eau de l'air va former des gouttes liquide qui vont retomber dans le moût) ;
- Surface d'échange ; c'est la surface supérieure du chaudron de cuisson, la surface libre du moût (zone de contact eau/air).

Le taux d'évaporation est **approximativement défini** par la formule suivante :

$$E = f(u) \cdot (P_a - P_s) \quad , \text{ avec}$$

- $f(u)$, constante de proportionnalité lié au vent (ou turbulence)
- P_a , pression actuelle de la vapeur d'eau dans l'air ambiant
- P_s , pression vapeur d'eau à saturation à la température évaporant

17.10.g. Taux d'évaporation

Le taux d'évaporation classique est considéré de 7 à 8 %, les brasseries professionnelles descendent parfois à 4 %.

Les moûts à forte densité nécessitent souvent une ébullition plus longue, dont le taux peut être plus élevé.

L'évaporation est nécessaire au brassage, car elle permet :

- Concentrer le moût (par évaporation de l'eau, la partie non aqueuse augmente en pourcentage) et donc d'en augmenter la densité ; cela permet de réguler la densité voulue si on a une densité trop faible ;
- Mais surtout d'évaporer certaines substances indésirables comme les DMS par exemple ;
- De stériliser totalement le moût ;
- De développer l'amertume et les arômes des aromates.

Pour que l'évaporation se produise de manière efficace (taux de 5 à 8 %) il faut une forte chaleur (ébullition bouillonnante) et un couvercle partiel. À pratiquer dans une pièce bien aérée (pour limiter la saturation de l'air).

17.10.h. Équilibre évaporation-condensation

La dissolution des gaz dans un liquide est le même phénomène que l'évaporation vu plus haut, mais en sens inverse. En réalité les 2 se produisent en même temps (évaporation et dilatation) et en permanence. Ce sont les conditions de pression et température qui change l'équilibre entre les 2 phénomènes. Il en résulte un équilibre des phases gazeuses et liquide.

L'évaporation se produit plutôt lorsque le liquide est plus chaud que le gaz, que le volume du gaz est plus important que le volume d'eau et que la pression est plutôt basse. La dissolution est favorisée par des températures basses et une pression élevée.

Ces phénomènes sont régis par la loi de Henry qui stipule que la concentration en gaz dissous est proportionnel à la pression partielle du gaz au-dessus du liquide.

On l'exprime par $C_G = \beta_G \cdot P_G$, avec :

- C_G , la concentration du gaz dans le liquide
- P_G , la pression partielle du gaz au-dessus du liquide
- β_G , le coefficient de solubilité qui dépend du gaz, du liquide et des conditions

17.11. Dilatation

Référence : [wikipédia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Dilatation)

La dilatation est l'expansion, à pression constante, des dimensions d'un corps occasionnée par son échauffement. La contraction est le phénomène inverse : la réduction de volume occasionnée par le refroidissement.

Selon la structure du matériau la dilatation thermique peut être isotopique (la même dans toutes les directions) ou anisotopique (qui varie suivant la direction, c'est le cas des solides cristallins).

La dilatation est un phénomène de modification de dimension (donc de volume), mais le poids reste constant ; ce qui équivaut à une modification de la masse volumique (densité).

Comme toute matière, le moût se dilate et se contracte avec les variations de température (de même que la marmite, l'air...). Sa dilatation est considérée comme semblable à celle de l'eau pure (liquide isotopique).

Origine de la dilatation

La dilatation-contraction est un phénomène extrêmement puissant (phénomène atomique, inhérent à la structure de la matière) que rien ne peut vraiment arrêter à part une réduction de température (perte d'énergie).

L'origine de ce phénomène est atomique, il s'agit de l'agitation des atomes due à la température. Cette agitation moléculaire induit une sorte de vibration moyenne des molécules. Cette vibration induit un espacement des molécules entre elles, ce qui augmente le volume global en proportion de l'agitation.

Pour un gaz la dilatation se traduit souvent par une augmentation de pression (le volume étant contraint et le lien atomique très faible). Pour les liquides la dilatation se traduit par une augmentation de volume pouvant entraîner une hausse de pression modérée dans un espace clos. Pour un solide, il n'y a pas d'augmentation de pression possible (liens atomiques forts) et donc c'est uniquement le volume qui varie et fort peu de contrainte peuvent stopper cette dilatation.

Voir le chapitre États de la matière pour en savoir plus sur ce phénomène atomique.

Coefficient de dilatation

Référence : [wikipédia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Coefficient_de_dilatation)

Chaque matière a son coefficient de dilatation propre et ce coefficient varie avec la température, c'est le cas de l'eau (voir ci-dessous). Ce coefficient est l'expression inverse de la variation de masse volumique selon la température. Ainsi l'eau pure (liquide) est donnée pour :

- $\rho = 1\,000 \text{ kg/m}^3$ à 4 °C
- $\rho = 998,3 \text{ kg/m}^3$ à 20 °C
- $\rho = 958,13 \text{ kg/m}^3$ à 100 °C

Attention à ne pas mélanger coefficient de dilatation linéique (1 dimension, souvent noté α) et le coefficient de dilatation volumique (3 dimensions, souvent noté β). Pour les matériaux isotropes la relation est simplement $\beta = 3 \cdot \alpha$.

D'un point de vue formelle ces coefficients sont dits isobare (à pression constante).

Tableau 16: Coefficient de dilatation de l'eau et l'éthanol

Matériau	Température	Dilatation linéaire		Dilatation volumique	
	°C	K ⁻¹	% / °C	K ⁻¹	% / °C
Acier inoxydable	0 à 100 °C	12×10^{-6}	0,0012		
Aluminium	0 à 100 °C	23×10^{-6}	0,0023		
Polypropylène (PP)	0 à 100 °C	150×10^{-6}	0,0150		
Verre ordinaire	0 à 100 °C	9×10^{-6}	0,0009		
Eau	10 °C			0,000272	0,027 %
	20 °C			0,00177	0,18 %
	30 °C			0,004343	0,43 %
	40 °C			0,00781	0,78 %

50 °C			0,01206	1,2 %
60 °C			0,01698	1,7 %
70 °C			0,02300	2,3 %
80 °C			0,02899	2,9 %
90 °C			0,03590	3,6 %
100 °C			0,04312	4,3 %

Volumes de brassage

Dans le brassage, la dilatation est ainsi évaluée à 4,3 % à température d'ébullition (100 °C) et 0,18 % à 20 °C, soit un écart de 4,12 % entre 20 °C et 100 °C. Pour un volume d'ébullition de 20 litres, cela représente une variation de volume de 0,824 L (0,0412×20).

Ici on assimile le moût à de l'eau pure, ce qui est une bonne approximation pour le moût. Dans le cas de la bière ou de la bière verte c'est différent puisqu'elle contient de l'alcool dont la dilatation est bien plus élevée.

Cette dilatation thermique, va fausser les mesures de volume et de densité lorsque le moût est chaud. C'est pourquoi il convient de rectifier ces mesures lorsqu'elles sont effectuées à chaud si on veut les comparer à d'autres effectuées à d'autres températures. Voir l'annexe Gérer les volumes.

Cas de l'eau

Référence: [La dilatation et l'état physique de l'eau \(J. Duclaux, 1911\)](#)

Si beaucoup de matériaux ont un coefficient de dilatation plutôt constant (dans les plages de températures « normales »), l'eau a un coefficient de dilatation de type parabolique. Ce qui rend les calculs précis complexes à partir de tables.

Jacques Duclaux a établi en 1911 des formules à usage pratique à partir des travaux précédents de Mendéléeff, Thiesen et Chapuis, qui donne une bonne approximation pour la plage -10 à +110 °C, soit :

Volume : $V = 0,9918335 + 0,00022516 \times t + 0,0000028444 \times t^2 + 5,3977 \times 10^{\frac{1143}{T} - 7}$

Coefficient de dilatation : $\alpha(10^{-6}) = 225,16 + 5,6888 \times t - \frac{1420,5962}{T^2} \times 10^{\frac{1143}{T}}$

Avec

- t : température (°C)
- T : température (K), $T = t + 273,15$
- V : Volume unitaire (1)
- α : coefficient de dilatation (10^{-6} K^{-1})

Paradoxe de l'eau

L'eau est un cas particulier d'anomalie dilatométrique qui présente un comportement particulier dans sa phase liquide entre 0 et +4 °C. Lorsque la température augmente dans cet intervalle l'eau se contracte, son volume massique diminue, ce qui correspond à un coefficient de dilatation négatif sur cette plage.

Ainsi à 0 °C l'eau a une densité de 999,8 kg/m³.

Cas de l'éthanol

L'éthanol est aussi un cas très étudié, de par son importance pour l'homme et les taxes.

À compléter

17.12. Propriétés des gaz et gaz parfaits

https://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9orie_cin%C3%A9tique_des_gaz

https://fr.wikipedia.org/wiki/Gaz_parfait

17.12.a. Théorie cinétique des gaz

C'est l'étude du comportement microscopique des gaz, à l'échelle moléculaire et de leurs interactions qui régissent leur comportement macroscopique. C'est une méthode où l'on applique des comportements individuels à un grand nombre d'individus. La principale application de cette méthode ce sont les lois des gaz parfaits.

Cette théorie par des principes suivants :

- Le nombre de molécules est très grand, mais les volumes en jeu sont encore plus grands, ce qui rend les molécules très distantes les unes des autres ;
- Les molécules se déplacent au hasard avec une distribution des vitesses globalement constantes ;
- Les molécules ont des collisions élastiques entre elles et les parois du contenant mais en dehors de ces interactions, n'ont aucun effet les unes sur les autres (du fait des grandes distances) ;
- Les molécules suivent les lois de Newton.

17.12.b. Loi des gaz parfaits

Un gaz parfait est défini comme un gaz dans lequel toutes les collisions entre atomes ou molécules sont parfaitement élastiques et où il n'y a pas de forces intramoléculaires (de par les distances importantes entre ces particules). On peut alors considérer les particules qui le compose comme de petites sphères très dures qui entrent en collisions. Dans les gaz parfaits toutes les énergies internes sont sous forme d'énergie cinétique et tout changement d'énergie est accompagné d'un changement de température. C'est un modèle thermodynamique qui s'applique aux gaz réels dans des conditions normales. Les conditions normales sont par définition : pression $P=101\,325\text{ Pa}$ (soit 1 atm, la pression atmosphérique moyenne sur terre) et $T=273,15\text{ K}$ ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$). Dans ces conditions la loi des gaz parfaits est une bonne approximation des gaz réels.

La loi s'exprime alors comme :

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad \text{ou} \quad P \cdot V = N \cdot k \cdot T, \text{ avec :}$$

- n : nombre de molécules (mol)
- R : constante universelle des gaz = $8,3145\text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- N : nombre de molécules
- k : constante de Boltzmann = $1,38066 \cdot 10^{-23}\text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$, k peut aussi s'exprimer comme $k = \frac{R}{N_A}$,
avec N_A le nombre d'Avogadro = $6,0221 \cdot 10^{23}\text{ mol}^{-1}$

Éclaircir n et N

De par la base théorique de la cinétique des gaz l'ensemble des lois des gaz parfaits n'est applicable qu'aux conditions de pression faible ou moyenne (lorsque l'on peut négliger l'effet d'interactions des particules de par leur faible densité).

17.12.c. Loi de Newton, collisions et pression

La force qui s'applique sur une paroi d'un contenant est égale à la force moyenne des particules contenues. Cette force moyenne est la moyenne des forces individuelles des particules qui parcourent l'espace du contenant aléatoirement (dans toutes les directions). Les collisions étant de plus considérées comme élastiques (pas de perte d'énergie), on a alors :

$$P = \frac{2 \cdot N}{3 \cdot V} \cdot \left[\frac{1}{2} m \cdot v^2 \right], \text{ avec :}$$

- N , le nombre de particules (mol)
- V , le volume du contenant (m^3)
- m , la masse d'une

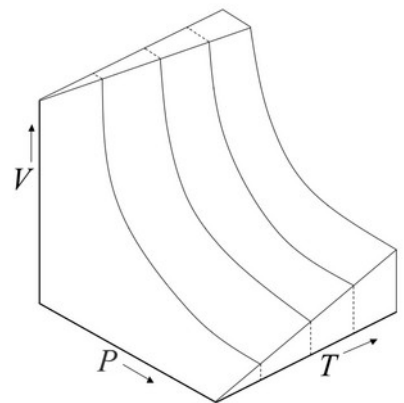


Figure 28: Isotherme d'un gaz parfait (P, V, T) (source : wikipédia)

- v^2 , la moyenne des vitesses des particules. ésson des gaz

17.12.d. Cas particuliers

Loi de Boyle-Mariotte

Lorsque la température est constante, la loi des gaz parfaits prend la forme de la loi de Boyle-Mariotte :

$$\boxed{P_i \cdot V_i = P_j \cdot V_j} \text{ on dit aussi que le rapport } P \cdot V \text{ est constant.}$$

Pour un gaz parfait dans un contenant hermétique, à une température constante, une diminution de volume d'un gaz entraîne une augmentation de la pression et réciproquement.

C'est le cas lorsque le gaz est contenu dans un contenant hermétique par exemple.

Loi de Charles

Lorsque la pression est constante, la loi des gaz parfait prend la forme de la loi de Charles :

$$\boxed{\frac{V_i}{T_i} = \frac{V_j}{T_j}}, \text{ on dit aussi que le rapport } \frac{V}{T} \text{ est constant.}$$

À pression constante, le volume d'un gaz parfait est directement proportionnel à la température absolue (K).

17.12.e. Température cinétique

En combinant la théorie cinétique des gaz et la loi des gaz parfaits on aboutit à :

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T, \text{ avec } P \cdot V = \frac{2}{3} \cdot N \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \right]$$

On aboutit ainsi à $T = \frac{2 \cdot N}{3 \cdot n \cdot R} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \right]$, soit $T = \frac{2}{k} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \right]$, que l'on exprime souvent sous la forme $KE_{\text{moy}} = \left[\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \right] = \frac{3}{2} \cdot k_B \cdot T$ qui est la moyenne de l'énergie cinétique moléculaire.

17.12.f. Fraction molaire et pression partielle (loi de Dalton)

La fraction molaire d'un gaz dans un mélange gazeux est le rapport entre le nombre de moles de ce gaz et le total de moles du mélange. Soit :

$$\boxed{\frac{n_G}{\sum n_x}}$$

La loi de Dalton (ou la loi des pressions partielles) énonce que la pression au sein d'un mélange de gaz parfaits est égale à la somme des pressions partielles de ses constituants. Elle n'est applicable qu'aux gaz parfaits. C'est aussi : la pression partielle d'un gaz x dans un mélange est la pression de ce gaz si il occupait seul le volume du mélange.

Soit :
$$\boxed{P_{\text{total}} = \sum_{x=1}^n P_x}$$

Selon la loi des gaz parfaits on a $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$, soit pour le gaz x, $P_x = \frac{n_x \cdot R \cdot T}{V}$

La pression totale est alors la somme des pressions partielles, soit
$$\boxed{P_{\text{totale}} = \sum_{i=1}^n n_i \cdot \frac{R \cdot T}{V}}.$$

17.12.g. Volume molaire, volume massique et masse volumique des gaz parfaits

Le volume molaire est le volume qu'occupe 1 mole gaz parfait.

Le volume molaire (volume d'1 mole) est $V_0 = \frac{n \cdot R \cdot T}{P}$. Comme ici on considère V_0 le volume d'1

mole, on a $n=1$, soit : $V_0 = \frac{R \cdot T}{P}$.

Le volume molaire ne dépend donc que de la température et de la pression. Dans le cadre des gaz parfait et aux conditions normales tous les gaz occupent environ 0,022413996 m³/mol, soit 22,414 L/mol.

La masse volumique est définie classiquement par $\rho = \frac{m}{V}$. Si on extrapole aux gaz parfaits et que l'on

calcule leur densité pour 1 mole, on peut alors écrire : $\rho = \frac{M \cdot P}{R \cdot T}$, avec M, la masse molaire de l'atome du gaz ou la masse moléculaire de la molécule de gaz.

Ainsi le CO₂ a une masse molaire de 44,095 kg/mol (ou g/L).

18. Introduction à la chimie

Référence : [wikipédia](#)

La chimie est une science naturelle qui étudie la matière et ses transformations.

18.1. Structure de la matière

18.1.a. Élément chimique

Il s'agit d'une entité immatérielle dénuée de propriétés physiques ou chimiques. Il constitue un couple formé d'un symbole et d'un numéro atomique (Z) qui caractérise les atomes, molécules ions, nucléides isotopes d'une espèce chimique. Ce nombre Z correspond à la charge positive du noyau (Positron)

Les éléments sont classés suivants une table dite périodique (voir [chapitre dédié](#)).

Un élément ne peut se transformer en un autre élément par une réaction chimique, seul une réaction nucléaire peut opérer une telle transformation.

Exemple : l'Hydrogène (symbole : H) est un élément en ce sens qu'il est élémentaire (non décomposable en autre élément). Il est non matériel en ce sens qu'il n'existe pas comme tel (H). Dans la nature on a le gaz H_2 (dihydrogène), l'ion H^+ (voir H) ou sous forme de composé chimique (Eau : H_2O , hydrocarbures C_xH_y).

18.1.b. Atome

L'atome d'une espèce chimique représente une entité matérielle.

L'atome est formé d'un **noyau atomique** contenant des **nucléons**, en particulier d'un nombre Z (**proton**) de charge électrique élémentaire positive (+), aussi nommé numéro atomique, qui maintient autour de lui un nombre d'**électrons** de charge négative (-) équilibrant la charge positive du noyau. Le noyau peut aussi contenir des **neutrons** (sans charge électrique).

Le total des nucléons composant le noyau (proton+neutron) est appelé Nombre de Masse et noté A.

Il possède approximativement un rayon, une structure géométrique, ainsi que des propriétés chimiques et physico-chimiques particulières.

Un atome constitue la plus petite partie d'un corps simple pouvant se combiner chimiquement avec une autre.

Si souvent les électrons sont représentés comme des particules en orbite, la réalité semble bien plus complexe et les physiciens parlent volonté plutôt de nuage d'électrons ou nuage électronique. Les « orbites » semblent très floues et ce nuage est plutôt organisé en couches. Plus un électron est proche du noyau plus la liaison est forte et nécessitera de l'énergie pour l'en extraire.

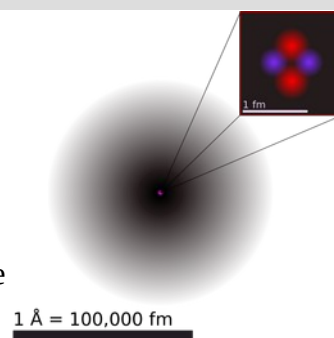


Figure 29: Représentation d'un atome / source : [wikipédia.fr](#)

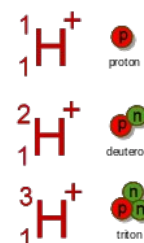
Tableau 17: Caractéristiques des nucléons

	Proton	Électron	Neutron
Charge	+1	-1	0
Masse (g)	$1,672 \cdot 10^{-24}$	$9,108 \cdot 10^{-28}$	$1,675 \cdot 10^{-24}$
Charge électrique (C)	$+1,602 \cdot 10^{-19}$	$-1,602 \cdot 10^{-19}$	0

Les atomes sont décrits par la table périodique des éléments (voir [chapitre dédié](#)).

18.1.c. Isotope

Un isotope d'une espèce atomique constitue une entité matérielle caractérisée par un nombre de neutrons dans le noyau différent de l'état le plus courant. Un isotope possède des propriétés nucléaires spécifiques. Les propriétés chimiques des divers isotopes ne diffèrent pas entre elles pour les atomes suffisamment lourds, pour les atomes légers par contre les isotopes peuvent avoir des propriétés très différentes.



On note le nombre de masse A (qui différencie les différents isotopes d'un même élément) en notant ce nombre au haut à gauche de son symbole.

Ainsi l'Hydrogène (H) est l'atome le plus léger, son numéro atomique $Z=1$ indique qu'il est composé d'un proton et d'un seul électron. Toutefois il existe des isotopes comprenant 1 neutron en plus ou même 2 neutrons. Étant très léger ces isotopes ont des propriétés différentes de l'hydrogène. On les distingue par leur nombre de masse A.

Tableau 18: Exemple : isotopes de l'hydrogène

Symbole	Désignation	Stabilité	Commentaires
^1H ou H	Protium	Stable	Composant très majoritaire du gaz hydrogène sur terre (99,9 %)
^2H	Deutérium	Stable	Composant très minoritaire du gaz hydrogène sur terre (0,01 %)
^3H	Tritium	Instable	Apparaît furtivement lors des explosions nucléaires.

18.1.d. Ions

Un ion représente un atome ou une molécule qui a perdu ou gagné un ou plusieurs électrons.

On distingue 2 catégories :

- Cation (+) : atome ayant perdu un électron, donc de charge globale positive ;
- Anion (-) : atome ayant gagné un électron, donc de charge globale négative.

Un composé ionique est un composé chimique constitué d'ions négatifs et positifs mais globalement neutre. Sa stabilité est bien moindre qu'une molécule car les énergies de liaison sont plus faible.

Exemples d'ions et de composés ioniques :

- H^+ représente un hydron, soit un atome d'hydrogène privé de son seul électron
- Cu^{2+} représente un ion Cuivre déchargé de 2 électrons.
- Cl^- représente un ion Chlore chargé d'un électron
- NaCl représente un composé ionique association d'un ion Na^+ et d'un ion Cl^- .
- CaCl_2 représente un composé ionique association d'un ion Ca^{2+} avec 2 ions Cl^-

18.1.e. Molécule

Une molécule est un assemblage précis d'atomes défini par un ensemble de liaisons chimiques assurant son intégrité, en conditions stables. Voir le chapitre sur les [liaisons chimiques](#) plus bas.

Une molécule se comporte essentiellement comme une entité aux propriétés propres.

Il existe des molécules de toutes tailles, du plus simple (2 atomes) à des milliers (protéines).

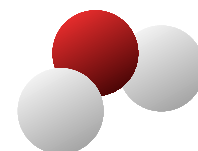
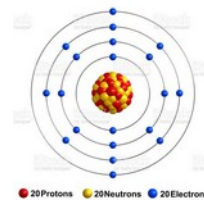
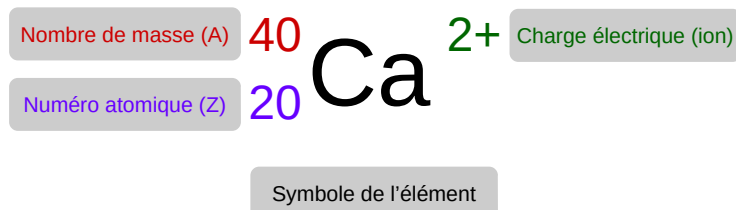


Figure 30:
Représentation
d'une molécule H_2O

18.1.f. Notation Symbolique

Notation des atomes et ions



- Le **symbole alphabétique** central représente le symbole de l'élément chimique décrit. Dans l'exemple « Ca » représente l'élément Calcium.
- Le chiffre en bas à gauche représente le **numéro atomique (Z)** : unique pour chaque élément, soit le nombre de proton. Rarement indiqué car c'est un pléonasme du symbole. Dans l'exemple $Z=20$, le noyau comprend donc 20 protons.

- Le chiffre en haut à gauche représente le **nombre de masse (A)**, soit le nombre total de nucléons du noyau. Dans l'exemple A=40, comme Z=20, la différence A-Z fait 20, donc cet élément ne possède 20 neutrons.
- Le signe en haut à droite représente la charge électrique (pour les ions donc) et représente la différence entre le nombre d'électrons (chargé -) et le nombre de protons (chargé +). La différence entre Z et la charge indique l'écart d'électrons. Lorsque la charge est nulle (0), le nombre d'électron est égal à Z. Dans l'exemple Ca^{2+} signifie que l'élément Ca a une charge positive de 2 unités et donc cet atome a perdu 2 électrons, comme Ca possède « normalement 20 charges, il reste donc 18 électrons..

Quelques exemples :

- ^2H : isotope de l'hydrogène avec 2 nucléons, l'hydrogène ayant un numéro atomique Z=1 (proton), le second nucléon est donc un neutron. N'étant pas ionisé (aucun signe électrique) il possède aussi un électron en orbite.
- Cl^- : ion chlore (atome de chlore ayant capté 1 électron)

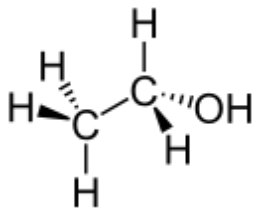
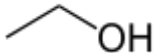
Représentation des molécules

Référence : [wikipédia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Représentation_des_molécules)

La notation symbolique la plus simple en chimie est la notation de formule brute, c'est celle que nous utiliserons le plus souvent. Il existe des représentations plus graphiques dites formules structurales qui apportent une information plus complète sur la façon dont les atomes sont reliés entre eux et disposés dans l'espace (la représentation est en 2D).

Il existe aussi des représentations graphiques en 3D plus symbolique que réellement informative.

Et il existe de nombreuses bases de données apportant des identifiants à vocation de normalisation ou législative.

Exemples de différentes représentations d'une même molécule d'éthanol				
$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$			$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{OH}$	
Formule brute	Formule structurale (Cram)	Formule topologique	Formule semi-développée (plane)	Vue 3D
64-17-5	100.000.526	E1510	D08AX08 V03AB16 V03AZ01	702
Numéro CAS	Numéro ECHA	Numéro additif alimentaire	Code ATC	Numéro PubChem

Formule brute

Cette formulation n'indique pas la structure mais la composition uniquement (les éléments). Il peut exister différents composés chimiques décrits par la même formule brute.



Les symboles de base des atomes, molécules et ions est basé sur la notation suivante :

- D'une part 1 ou 2 lettres (dont la première en majuscule) pour symbole des éléments du tableau périodique, exemple : Ca, H, K, Cu, Na, Cl...
- Suivi optionnellement d'une valeur numérique en indice (bas) qui indique le nombre de cet élément dans la molécule, s'il n'y a pas de valeur en indice la valeur est implicitement 1, exemple : H_2O (eau) qui indique 2 atomes d'hydrogène (H) associé à 1 atome d'oxygène (O)
- Suivi optionnellement d'une valeur numérique en exposant associé à un signe + ou - pour représenter les ions (+ les ions positifs, - les ions négatifs). Exemple Ca^{2+} .

Exemples :

- Cl^- , l'ion de chlore (Cl) ;
- HCO_3^- , le bicarbonate, l'association d'un ion d'hydrogène (H^+) et d'un ion carbonate (CO_3^{2-}) ; composé lui-même d'un atome de carbone et de 3 atomes d'oxygène (O).
- CO_2 : molécule composée d'un atome de carbone et de 2 atomes d'oxygène, soit le dioxyde de carbone ou gaz carbonique.

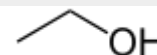
Formule semi-développée plane

Cette formulation indique la structure de base de la molécule sous forme 2D simplifiée en ne représentant pas les liaisons Carbone-Hydrogène.



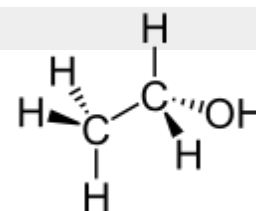
Formule topologique

Cette formulation permet de rendre plus lisible les molécules organiques en représentant les liaisons Carbone-Carbone par un trait (double trait pour les liaisons double) et en ne représentant pas les liaisons Carbone-Hydrogène (implicite).



Formule structurale (dite de Cram)

Cette formulation en 2D est la plus complète, elle donne des indications structurales plus précises que la formulation semi-développée. La molécule est représentée dans le plan le plus important et les liaisons dans l'axe vertical sont représentées par des triangles pleins (avant plan) ou hachurés (arrière plan).



Identifications

Au niveau chimique il existe en outre différentes identifications sans lien avec la composition, utilisées par des agences gouvernementales à titre législatif la plupart du temps :

- **Numéro CAS** : Il s'agit du numéro d'enregistrement d'une substance auprès du *Chemical Abstracts Service* (CAS) ; une banque de données américaines qui enregistre près de 100 millions de substances et utilisées internationalement. Les isomères d'une molécule ont des numéros différents. L'eau pure est identifiée par le numéro CAS : 7732-18-5.
- **Numéro ECHA** : Il s'agit de l'identification d'un produit chimique autorisé par l'*Agence européenne des produits chimiques* dans le cadre du référentiel *REACH* créée en 2006, y figure les substances chimiques autorisées en Europe.
- **Code ATC** : codification des substances médicales tenue par l'agence *Collaborative Centre for Drug Statistics Methodology* de l'OMS. La première lettre indique un groupe. Une molécule peut avoir plusieurs identifiants dans le cas où elle existe pour plusieurs voies d'administration.
- **PubChem** : Une base de données américaines des substances chimiques gérée par le *National Center for Biotechnology Information* et qui met à disposition sa base de données en ligne et gratuitement.
- **Additifs alimentaires** : identifiant E suivant d'un chiffre et normalisé par l'*Union Européenne*. S'ils entrent dans la composition d'un aliment, ils doivent être indiqués sur l'étiquette de composition du produit. Il s'agit de conservateurs, colorants, antioxydants, exhausteurs de goûts, etc. Exemple E410 : la gomme de caroube.

18.1.g. Corps simples / Corps composés

Un corps simple est une substance stable composée d'un seul type d'élément, par opposition aux corps composés, constitués d'au moins 2 éléments différents associés de diverses manières.

Exemples :

- Corps simples : O_2 (oxygène)
- Corps composés : $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ (éthanol)

18.1.h. Isomère

Il s'agit d'un groupe de molécules composés des mêmes éléments (même formule brute) mais associé différemment (formule développée) qui lui confère des propriétés différentes. La conformation des éléments entre eux est aussi importante que les éléments dans les propriétés d'une molécule. C'est pourquoi les isomères portent des dénominations différentes et ont donc des propriétés différentes, même s'ils partagent la même formule brute.

Exemples :

- Butane / isobutane (méthylpropane)
- Hexoses : Glucose / fructose / galactose / mannose / allose
- Éthanol / méthoxymétane

18.1.i. Liaisons chimiques

Une liaison chimique est une interaction entre plusieurs atomes, ions ou molécules à une distance permettant la stabilisation du système et la formation d'un agrégat ou d'une substance chimique. Il existe plusieurs types de liaisons chimiques plus ou moins fortes. Les plus courantes, notamment dans le cadre du brassage sont :

- Liaison de covalence : ou 2 atomes partagent des électrons, c'est une liaison forte ;
- Liaison ionique : ou la liaison est électrostatique entre 2 ions de charge opposé et formant ainsi une molécule électriquement neutre, d'une force plus faible que la covalence.

Pour créer ou briser une liaison chimique il faut apporter de l'énergie.

Une liaison ionique peut être, parfois, brisé par un simple solvant comme l'eau par exemple.

Liaison covalente

Une liaison covalente est une liaison chimique dans laquelle 2 atomes partagent des couples d'électrons provenant de leur couche externe afin de former des doublets d'électrons. C'est une force qui produit l'attraction des 2 atomes entre eux. Ces liaisons se produisent avec le chevauchement des orbites de chaque atome et les électrons covalents forment alors une orbite moléculaire plutôt qu'atomique. Elles se forment de préférence et plus facilement entre des éléments dont l'électronégativité est proche (soit entre métaux, soit entre non-métaux).

Ces liaisons sont fortement directionnelles et induisent des formes caractéristiques de liaison avec des angles spécifiques entre les atomes.

Ce type de liaison libère de l'énergie dans le milieu lors de leur création et nécessite un apport d'énergie externe pour leur destruction.

Ces liaisons peuvent impliquer de 1 à 3 doublets d'électrons, on parle liaison simple, double ou triple et sont symbolisés avec 1, 2 ou 3 traits de liaison entre les atomes.

Exemples :

- Dioxygène (oxygène de l'air) : O_2 ou $O=O$
- Eau : H_2O : $H-O-H$

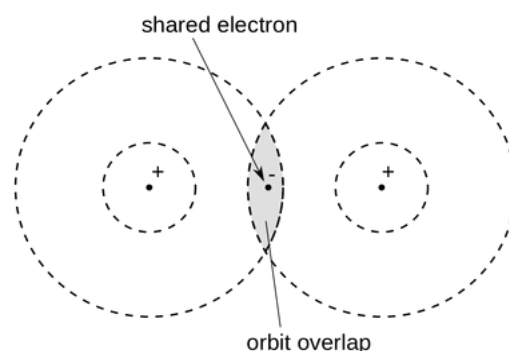


Figure 31: Illustration simplifiée d'une liaison de covalence / source : Wikipédia

Liaison ionique

Une liaison ionique (parfois appelée électrovalente) est une liaison chimique pouvant se former entre une paire d'atomes possédant une grande différence d'électronégativité (voir définition dans le chapitre suivant), typiquement un métal et un non-métal. Le métal donne un ou plusieurs électrons pour

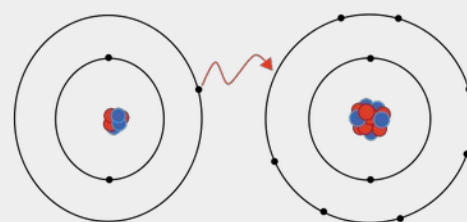


Figure 32: Illustration simplifiée d'une liaison ionique / source : Wikipédia

former un ion chargé positivement (cations). Le non-métal capte ces électrons pour former un ion chargé négativement (anion). La liaison résulte des charges électriques opposés (cations / anions) : force électrostatiques.

Cette liaison n'est ni dirigée, ni localisée.

Exemples :

- Chlorure de Sodium (ou sel de table) : $2 \cdot Na + Cl_2 \rightarrow 2 Na^+ + 2 \cdot Cl^- \rightarrow 2 \cdot NaCl$

18.1.j. Polarité

En chimie, la **polarité** est la façon dont les charges électriques négatives et positives sont réparties dans une molécule ou une liaison chimique. La polarité est due à la différence d'électronégativité entre les atomes qui la composent, aux différences de charge qu'elle induit, et à leur répartition dans l'espace. La molécule ou la liaison est ainsi considérée comme un dipôle électrostatique : plus les charges sont réparties de façon asymétrique, plus elle est polaire, et inversement. Si les charges sont réparties de façon totalement symétrique, elle sera apolaire, c'est-à-dire qu'elle n'a pas de polarité électrique et n'est donc pas un dipôle électrostatique.

La polarité et ses conséquences (forces de van der Waals, liaison hydrogène) influent sur un certain nombre de caractéristiques physiques (tension superficielle, point de fusion, point d'ébullition, solubilité) ou chimiques (réactivité).

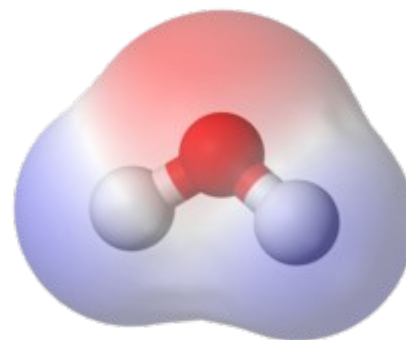


Figure 33: Polarité d'une molécule d'eau / source : wikipedia commons

Exemple de l'eau

Dans la molécule d'eau H_2O les électrons des atomes d'hydrogène sont fortement attirés par l'atome d'oxygène au point d'être plus proche du noyau d'oxygène que de ceux d'hydrogène. Ce qui entraîne une charge légèrement négative (rouge) du côté de l'oxygène et une charge plutôt positive vers les 2 atomes d'hydrogène (bleu).

L'eau étant polarisée, les molécules polarisées elles aussi sont hydrophiles (aime l'eau et s'y dissolvent facilement) et ioniques ; par opposition les atomes ou molécules apolaires sont hydrophobes (aucune affinité).

18.2. Tableau périodique des éléments chimiques

Référence : [wikipedia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Tableau_périodique_des_éléments_chimiques)

Conçu originellement par *Dimitri Ivanovitch Mendeleev* en 1869, cette table de classement des éléments chimiques a depuis largement évolué. Elle est aussi issue des nombreux autres travaux précédents de tentative de classement des éléments chimiques. Il est désormais standardisé et défini par l'UICPA (Union Internationale de la Chimie Pure et Appliquée).

Chaque élément est noté, dans une case colorée, accompagné d'informations descriptives dont principalement son nom complet, son symbole, son numéro atomique Z et sa masse atomique le plus souvent.

Les éléments sont ordonnés par numéro atomique (Z) croissant (de gauche à droite et de haut en bas) et en fonction de leur configuration électronique (nuage d'électrons).

Tableau périodique des éléments chimiques

Groupe → I A II A
 Période 1 2
 1 Hydrogène **H** 1,007975
 2 Lithium **Li** 6,9395 Béryllium **Be** 9,0121831
 3 Sodium **Na** 22,98976928 Magnésium **Mg** 24,3055
 4 Potassium **K** 39,0983 (1) Calcium **Ca** 40,078 (4)
 5 Rubidium **Rb** 85,4678 (3) Strontium **Sr** 87,62 (1)
 6 Césium **Cs** 132,90545196 Baryum **Ba** 137,327 (7)
 7 Francium **Fr** [223] Radium **Ra** [226]

nom de l'élément (gaz, liquide ou solide à 0°C et 101,3 kPa)
 numéro atomique
 symbole chimique
 masse atomique relative (ou celle de l'isotope le plus stable)
 [CIAAW "Atomic Weights 2013" + rev. 2015]

13 Bore **B** 10,8135 14 Carbone **C** 12,0106 15 Azote **N** 14,006432 16 Oxygène **O** 15,9994 17 Fluor **F** 18,99840316 18 Néon **Ne** 20,1797 (6)
 19 Aluminium **Al** 26,9815385 20 Silicium **Si** 28,085 (1) 21 Phosphore **P** 30,97376209 22 Soufre **S** 32,0675 23 Chlore **Cl** 35,4515 24 Argon **Ar** 39,948 (1)
 25 Gallium **Ga** 69,723 (1) 26 Germanium **Ge** 72,630 (8) 27 Arsenic **As** 74,921595 28 Sélénium **Se** 78,971 (8) 29 Brome **Br** 79,904 30 Krypton **Kr** 83,798 (2)
 31 Rubidium **Rb** 85,4678 (3) 32 Strontium **Sr** 87,62 (1) 33 Yttrium **Y** 88,90584 34 Zirconium **Zr** 91,224 (2) 35 Niobium **Nb** 92,90637 36 Molybdène **Mo** 95,95 (1) 37 Technétium **Tc** [98] 38 Ruthénium **Ru** 101,07 (2) 39 Rhodium **Rh** 102,90550 40 Palladium **Pd** 106,42 (1) 41 Argent **Ag** 107,8682 (2) 42 Cadmium **Cd** 112,414 (4) 43 Indium **In** 114,818 (1) 44 Étain **Sn** 118,710 (7) 45 Antimoine **Sb** 121,760 (1) 46 Tellure **Te** 127,60 (3) 47 Iode **I** 126,90447 48 Xénon **Xe** 131,293 (6)
 49 Cérium **Ce** 140,116 (1) 50 Praseodyme **Pr** 140,90766 51 Néodyme **Nd** 144,242 (3) 52 Prométhium **Pm** [145] 53 Samarium **Sm** 150,36 (2) 54 Europium **Eu** 151,964 (1) 55 Gadolinium **Gd** 157,25 (3) 56 Terbium **Tb** 158,92535 57 Dysprosium **Dy** 162,500 (1) 58 Holmium **Ho** 164,93033 59 Erbium **Er** 167,259 (3) 60 Thulium **Tm** 168,93422 61 Ytterbium **Yb** 173,045 62 Lutécium **Lu** 174,9668
 63 Actinium **Ac** [227] 64 Thorium **Th** 232,0377 65 Protactinium **Pa** 231,03588 66 Uranium **U** 238,02891 67 Néptunium **Np** [237] 68 Plutonium **Pu** [244] 69 Américium **Am** [243] 70 Curium **Cm** [247] 71 Berkelium **Bk** [247] 72 Californium **Cf** [251] 73 Einsteinium **Es** [252] 74 Fermium **Fm** [257] 75 Mendélévium **Md** [258] 76 Nobelium **No** [259] 77 Lawrencium **Lr** [260]

Métaux : Alcalins, Alcalino-terreux, Lanthanides, Actinides, Métaux de transition, Métaux pauvres, Métalloïdes, Non-métaux : Autres non-métaux, Halogènes, Gaz nobles, Non classés.
 primordial, désintégration d'autres éléments, synthétique

Figure 34: Tableau périodique des éléments chimiques / source : wikipedia.fr

Les éléments y sont classés en 4 catégories principales : métaux, métalloïdes, non-métaux et non classés et 11 sous-catégories (ce sont les couleurs des cases).

La table comprend 118 éléments chimiques et 83 sont considérés comme primordiaux car comportant au moins 1 isotope stable dans les conditions générales (Terre). Les 24 derniers sont dits synthétiques et n'existent que dans des conditions très particulières (comme au sein d'un réacteur nucléaire ou d'une étoile).

103 éléments ont un état standard connu aux conditions normales (0 °C et 1 atm). On trouve parmi eux : 90 solides, 11 gaz et 2 liquides (brome et mercure).

Les propriétés physico-chimiques étant liées à la composition des couches électroniques (couches d'électrons autour du noyau) ce sont ces dernières qui permettent le positionnement des éléments en matrice et forme des blocs aux propriétés similaires.

Le tableau comprend 7 lignes principales (noté de 1 à 7) qui correspondent aux 7 couches électroniques connus. Les 18 colonnes correspondent à des sous-couches électroniques.

Quelques propriétés que le tableau met en évidence :

- Rayon atomique, c'est une mesure de la taille d'un atome, distance moyenne entre le noyau et la frontière électronique qui l'entoure. C'est une notion peu précise, car les électrons n'ont pas de position très précise. Uniquement valable pour un atome totalement isolé (car théorique).
- Énergie d'ionisation, c'est l'énergie de première ionisation ou énergie minimum pour retirer un électron à l'atome (et ainsi former un cation).
- Électronégativité, c'est une indication de la tendance d'un atome à attirer les électrons isolés.
- Affinité électronique, c'est la quantité d'énergie libérée lorsqu'un électron est ajouté à un atome neutre pour former un anion.
- Caractère métallique, on distingue 3 catégories principales :
 - Métaux, généralement solide, brillant très conducteur et susceptible de former des alliages avec d'autres métaux ainsi que des composés ioniques avec les non-métaux.
 - Non-métaux, généralement isolant et gazeux susceptible de former des composés covalents avec d'autres non-métaux et des composés ioniques avec les métaux.

- Métalloïdes, présentent des propriétés intermédiaires entre les métaux et non-métaux

18.3. États de la matière

Référence : [wikipédia](https://fr.wikipedia.org/wiki/État_de_la_matière)

La chimie n'intègre pas l'état de la matière qui est plutôt une notion Physique de thermodynamique. Toutefois il est important de connaître ces notions en chimie.

En physique, un **état de la matière** est une des 4 formes ordinaires que peut prendre toute substance dans la nature : solide, liquide, gaz et plasma (rare sur terre et encore plus rare pendant le brassage).

Diverses propriétés de la matière varient selon l'état : degré de cohésion, densité, structure cristalline, indice de réfraction... Ces propriétés se traduisent par des « comportements » différents, décrits par les lois de la physique : malléabilité, ductilité, viscosité, loi des gaz parfaits...

Échelle	Caractéristique	Solide	Liquide	Gazeux
Macroscopique	Volume propre	Oui	Oui	Non
	Forme propre	Oui	Non	Non
	Compressibilité	Non	Très faible	Grande
	Fluidité	Non	Oui	Oui
Atomique	Liaison	Forte	Faible	Très faible
	Positions relatives	Fixes	Dépendantes	Quasi indépendantes
	Présence d'ions	Possible	Possible	Non
Caractéristiques propres		Forme Volume	Miscibilité, Viscosité Surface libre et Tension superficielle	Mixage Dissolution dans une autre matière

Un état pour une matière donnée est dépendant de la température et de la pression. Lorsque ces conditions changent, il peut se produire des changements d'état qui sont plus ou moins rapides.

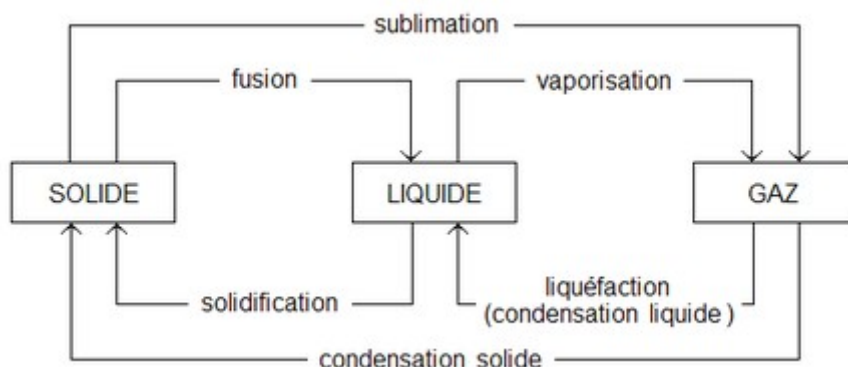


Figure 35: Principaux changements d'état de la matière (source : Wikipédia)

Dans le cadre du brassage nous ne rencontrons que les phénomènes de vaporisation (passage de l'état liquide à gazeux) et de liquéfaction (l'inverse).

Phase

En thermodynamique on utilise souvent le terme de phase, plutôt que d'état.

Si un système thermodynamique est entièrement homogène, physiquement et chimiquement, on dit qu'il constitue une seule phase. Dans le cas contraire on parle des plusieurs phases.

Ainsi le moût étant composés d'éléments liquide (eau) et solide (amidon, protéines) est un système à 2 phases et même probablement 3 phases puisque de l'air (gaz) y est incorporé lors du brassage ou les transferts.

L'état global du système peut évoluer au fur et à mesure des transformations subit et les composants peuvent changer de phase, on parle de transition de phase. Par exemple l'océan arctique est composé des

3 phases de l'eau : de l'eau liquide sur laquelle flotte de la glace (eau solide) et au-dessus dans l'air de l'eau gazeuse (humidité de l'air).

Diagramme de phase

Le diagramme de phase pour un corps pur est un graphique représentant les 3 états principaux cette matière pour les couples de paramètre Température et Pression. Il existe des diagrammes plus complexes en 3 ou plus dimensions, mais le diagramme à 2 paramètres reste le plus courant et correspond généralement aux conditions « normales ».

Ce diagramme comprend :

- Les traits noirs symbolisent les zones de transition de phase
- Et comprends 2 points spécifiques :
 - **Point triple**, ce sont les conditions (T, P) de rencontre des 3 états ;
 - **Point critique**, ce sont les conditions à partir desquels la distinction liquide / gaz devient floue et plus proche d'un gaz que d'autre chose (on parle de fluide supercritique).

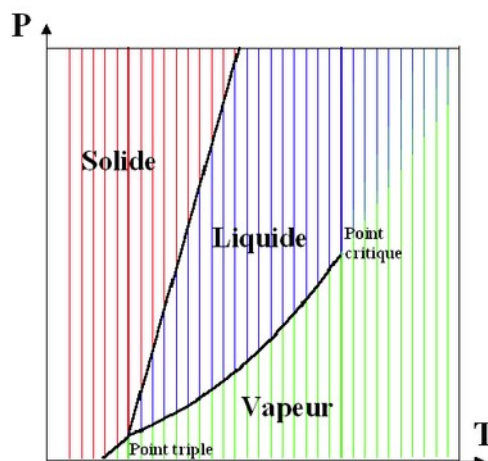


Figure 36: Exemple d'un diagramme de phase (source : Wikipédia)

À noter que pour les matières courantes et les conditions « normales » on ne rencontre que rarement les points triples ou points critiques. Par exemple pour l'eau pure, le point triple est à $T=0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $P=0,006\text{ atm}$; le point critique à $T=374\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $P=220\text{ atm}$. Autant dire que lors du brassage on se contentera des 3 états classiques, soit :

Tableau 19: Changement d'état de quelques matériaux

Transition vers $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $P = 1\text{ atm}$	Eau pure H_2O	Éthanol $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	Dioxyde de carbone CO_2	Glucose $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$
Fusion ($^{\circ}\text{C}$) Solidification	0	-117	-78	150
Vaporisation ($^{\circ}\text{C}$) Liquéfaction	100	79	-56	n/a

18.4. Chimie organique

La chimie organique est le domaine de la chimie qui étudie les composés organiques, c'est-à-dire les composés du **Carbone (C)**. Ces composés peuvent être naturels ou synthétiques.

Historiquement la chimie organique était celle des composés formés par le vivant. Ces composés étant composés avec du Carbone. Les scientifiques ont longtemps cru que seul le vivant crée ces composés (dits organiques). Cette définition historique n'a plus ce sens aujourd'hui, mais la terminologie est restée. La chimie organique est aussi par définition en opposition avec la chimie inorganique qui s'occupait des composés minéraux (non-vivants).

De nos jours la distinction existe toujours mais s'opère entre la chimie dominée par les liaisons de covalence (chimie organique) ou par les liaisons ioniques (chimie inorganique).

Une caractéristique du carbone consiste en l'aptitude qu'ont ses atomes à s'enchaîner les uns aux autres, par des liaisons covalentes, d'une façon presque infinie, pour former des chaînes carbonées d'une grande diversité. Les composés organiques sont ainsi constitués de molécules caractérisées par des enchaînements carbonés propres aux molécules dites « organiques ». Leur organisation peut être sous forme de chaînes, de chaînes ramifiées (avec des branches) ou cyclique.

Les molécules organiques contiennent fréquemment (en plus des atomes C) des atomes d'hydrogène (H) et souvent des atomes d'oxygène (O) ou d'azote (N).

18.5. Réaction chimique

Une réaction chimique est une transformation de la matière au cours de laquelle les espèces chimiques qui constituent la matière sont modifiées : les espèces qui sont consommées sont appelées réactifs. Les espèces formées au cours de la réaction sont appelées produits de réaction.

Depuis les travaux d'*Antoine Lavoisier* (1777), les scientifiques savent que la réaction chimique se fait sans variation mesurable de la masse : « *Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme* », qui traduit la conservation de la masse bien que ne soit pas une citation de Lavoisier, ni une absolue réalité.

Les réactions chimiques provoquent un changement de la nature chimique de la matière, sont donc exclues les transformations purement physiques, comme les changements d'état (fusion, solidification, évaporation, ébullition), l'usure, l'érosion et la rupture.

Une réaction peut dégager de l'énergie (en général sous forme de chaleur, mais aussi parfois de lumière), elle est alors une réaction **exothermique**. La création d'une liaison de covalence ou la création d'un anion (apport d'électron) est exothermique.

Elle peut nécessiter un apport d'énergie, sous forme de chaleur (donc « produire du froid ») ou de lumière, elle est alors une réaction **endothermique**. La destruction d'une liaison de covalence ou la création d'un cation (perte d'un électron) est endothermique.

D'une manière générale, une réaction ne peut avoir lieu que si certaines conditions sont réunies (présence de tous les réactifs, conditions de température, de pression, de lumière...).

Certaines réactions nécessitent ou sont facilitées par la présence d'une substance chimique, appelée **catalyseur**, qui n'est pas consommée par la réaction.

Classiquement, les réactions chimiques impliquent des changements qui concernent le mouvement des électrons, la formation et la rupture des liaisons chimiques.

En chimie organique, diverses réactions chimiques sont combinées dans la synthèse chimique afin d'obtenir le produit désiré. En biochimie, des séries de réactions chimiques catalysées par des enzymes forment les voies métaboliques, par lesquelles des synthèses et les décompositions d'habitude impossibles sont exécutées dans une cellule, voir le chapitre [Biochimie des enzymes](#).

18.5.a. Solvant

Un solvant est une substance, liquide ou supercritique à sa température d'utilisation, qui a la propriété de dissoudre, de diluer ou d'extraire d'autres substances sans les modifier chimiquement et sans lui-même se

modifier. Les solvants sont utilisés dans des secteurs très diversifiés tels que le dégraissage, les peintures, les encres, la détergence, la synthèse organique...

L'eau est le solvant le plus courant, la solution étant alors qualifiée de solution aqueuse.

18.5.b. Solution

Une solution se présente par un mélange homogène formé par un solvant en proportion majoritaire et d'un ou plusieurs solutés dans une phase homogène. Les réactions chimiques ont souvent lieu en solution.

La **solubilité** représente la capacité d'un corps à entrer en solution dans un milieu donné. Par exemple, un sel cristallin comme le chlorure de sodium NaCl (sel de cuisine) possède une limite de solubilité dans l'eau : $357 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ d'eau à 0°C et $391 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ à 100°C . Cela signifie qu'avant cette concentration le sel se dissout dans l'eau (Na et Cl) et qu'à partir de cette teneur limite, le sel précipite ou se dépose sous forme solide. Il y a alors de séparation de phase.

La **miscibilité** constitue la capacité d'un corps à se mélanger avec un autre en formant une seule phase. Le gaz ammoniac NH_3 se mélange facilement à température ambiante avec l'eau liquide formant l'ammoniaque, 1 kg d'eau froide saturée d'ammoniac peut contenir 899 g de NH_3 . Les gaz principaux de l'air, dioxygène et diazote, sont aussi solubles en certaines proportions dans l'eau liquide. 100 g d'eau liquide à 0°C peut contenir au maximum $4,89 \text{ cm}^3$ du premier en solution et $2,3 \text{ cm}^3$ du second.

Les solutions sont rarement parfaites (1 seule phase) et comportent souvent en réalité plusieurs phases. Il a été établi un vocabulaire permettant de désigner ces « solutions ».

Sels (chimiques)

Les sels sont, en chimie, des composés ioniques de cations et d'anions formant un produit neutre (sans charge électrique). Ces ions peuvent être aussi bien minéraux (Cl^-) qu'organiques (acétate $\text{CH}_3\text{-COO}^-$) ou monoatomiques (Mg^{2+}) aussi bien que polyatomiques (CO_3^{2-}). Leur forme naturelle est un solide cristallin plus ou moins transparent.

Les solutions de sels (dissous dans un solvant liquide) sont appelés électrolytes, car conductrices de l'électricité, les éléments qui les composent sont séparés par hydrolyse.

À ne pas confondre avec le sel de table (NaCl) qui est un cas particulier de sel chimique. Une fois dissous en solution aqueuse le sel de table devient une saumure et est lui aussi conducteur d'électricité (la conduction dépend de la quantité de sel dissoute).

18.5.c. Suspension, Colloïde et Solution

Une **émulsion** se décrit comme une dispersion d'une phase liquide à l'état de gouttelettes microscopiques ou sub-microscopiques, dans une autre phase liquide non miscible. Une **suspension** constitue une dispersion d'une phase solide finement divisée au sein d'une autre phase liquide englobante. La stabilité d'une suspension ou d'une émulsion nécessite que les fines gouttelettes ou les grains en suspension soient stabilisés par des molécules amphiphiles qui se placent à l'interphase. Ainsi, aucune coalescence des gouttelettes ni d'agglomérations de particules solides ne persiste.

Les **colloïdes** (ou dispersion colloïdale) sont à mi-chemin entre la solution pure et l'émulsion/suspension).

Un colloïde est la suspension d'une ou plusieurs substances, dispersées régulièrement dans une autre substance liquide, formant un système à deux phases séparées. Dans un fluide, il forme une dispersion homogène de particules dont les dimensions vont du nanomètre au micromètre. Les suspensions colloïdales sont intermédiaires entre les suspensions (particules de taille supérieure au micromètre) et les solutions vraies (particules de taille inférieure au nanomètre).

La pectine (polysaccharide), certaines protéines, telles l'ovalbumine ou la gélatine, forment des suspensions colloïdales, dites macromoléculaires et permettent de fabriquer des flans et des gelées. D'autres glucides de haut poids moléculaire, tels l'amidon ou la cellulose, peuvent également former des colloïdes. Les peintures sans odeur, le lait ou le plasma sanguin sont des suspensions colloïdales.

Comme le précise le chimiste et gastronome moléculaire, *Hervé This*, l'immense majorité des systèmes culinaires ne constituent pas des émulsions, mais des dispersions colloïdales plus ou moins complexes.

L'art, à l'origine souvent empirique, de fabriquer des dispersions colloïdales a fourni des applications en pharmaceutique comme en cuisine, par exemple pour la préparation de chocolats et glaces, de sauces ou de mayonnaises.

	Solution	Colloïde	Émulsion / Suspension
Taille des particules	Inférieur nanomètre < 1 nm < 0,001 µm < 0,000001 mm	Nanométrique de 1 à 1000 nm	Supérieur au micromètre > 1000 nm > 1 µm > 0,001 mm

18.6. Quelques réactions chimiques

18.6.a. Oxydoréduction

Référence : [wikipédia](#)

Une **réaction d'oxydoréduction** ou **réaction redox** est une réaction chimique au cours de laquelle se produit un transfert d'électrons. L'espèce chimique qui capte les électrons est appelée « **oxydant** » et celle qui les cède, « **réducteur** ». On la caractérise par une variation du nombre d'oxydation de chacune des espèces concernées.

Les réactions d'oxydoréduction se produisent lors des combustions, pendant certains dosages métallurgiques, durant la corrosion des métaux, dans les phénomènes de l'électrochimie ou de la respiration cellulaire. Elles jouent un rôle particulièrement important dans le domaine de la biologie, lors de la transformation du dioxygène en eau (H₂O) au sein des organismes vivants.

La diversité des réactions d'oxydoréduction s'explique par la mobilité de l'électron, sa légèreté et son omniprésence dans toutes les formes de la matière.

Cette réaction doit son nom à ce que historiquement les scientifiques avaient lié cette réaction avec des interactions avec l'atome d'oxygène. Mais ce n'est que plus tard, avec la découverte de l'électron, que ce dernier est devenu l'élément déterminant de la réaction dont la définition a été étendue.

Ainsi, les « combinaisons avec l'oxygène » ne sont qu'un cas particulier des réactions d'oxydoréduction.

18.6.b. Acido-basique

Référence : [wikipédia](#)

C'est une réaction qui implique un transfert de proton (H⁺) depuis un acide vers une base.

Plus de détail dans le chapitre sur **l'acidité**.

18.6.c. Combustion

Référence : [wikipédia](#)

La **combustion** est une réaction exothermique d'oxydoréduction. Lorsque la combustion est vive, elle se traduit par une flamme ou par une explosion (déflagration, voire détonation si le front de flamme dépasse la vitesse du son).

Une combustion nécessite la présence de 4 éléments :

- Combustible, c'est ce qui brûle et existe sous différentes formes (solide, liquide, gazeux) ;
- Comburant, c'est l'autre réactif de la réaction chimique et général l'air ambiant et plus particulièrement le dioxygène ;
- Activateur, c'est l'élément qui déclenche la combustion, souvent la chaleur, un arc électrique ou une flamme ;
- Radicaux : Une réaction chimique est une recombinaison de molécules. Elle passe par une étape au cours de laquelle les molécules sont « déstructurées » mais pas encore recombinaison ; celles-ci sont appelées radicaux. Dans le cas de la combustion, les radicaux sont créés par rupture de liaison chimique due à l'énergie thermique, et ils vont pouvoir agir sur les molécules du produit (libérant d'autres radicaux) et engendrant de fait une réaction en chaîne qui va perdurer tant qu'il y a présence de combustible et de comburant.

18.6.d. Isomérisation

C'est une réaction chimique dans laquelle un composé chimique subit une modification de structure sans changer de formule brute. Rappel : un [isomère](#) est une molécule partageant une même formule brute avec une structure différente, lui donnant des caractéristiques et propriétés spécifiques.

C'est le cas de certains composés du houblon qui subissent une isomérisation pendant la [cuisson du moût](#).

18.6.e. Hydrolyse

Référence : [wikipédia](#)

C'est une réaction chimique dans laquelle une liaison covalente est rompue par action d'une molécule d'eau. Les hydrolyses sont des réactions lentes qui sont souvent accélérées par des enzymes en biochimie.

Lorsque le composé rompu est un Glucose, on parle alors de Glycolyse ([wikipédia](#)), c'est surtout cette réaction qui nous intéressera. Voir le chapitre sur les « [enzymes](#) ».

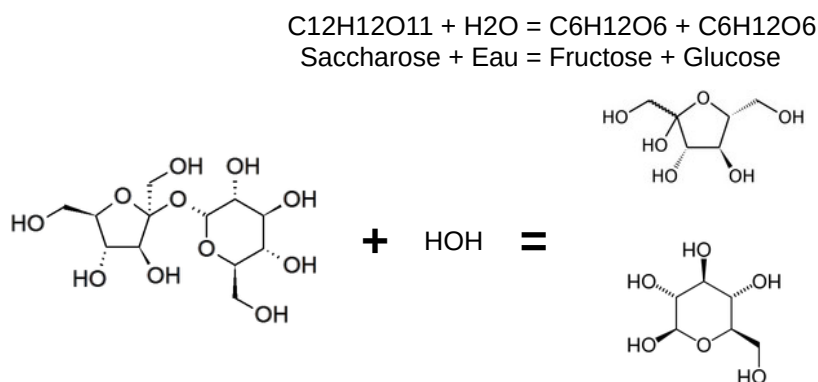


Figure 37: Hydrolyse du saccharose

18.6.f. Respiration (cellulaire)

La **respiration** est une fonction biologique qui permet aux êtres vivants d'utiliser leurs réserves énergétiques grâce à des échanges gazeux avec le milieu extérieur. De très nombreux organismes respirent : bactéries, végétaux, champignons, animaux, etc. Ici on s'intéressera particulièrement à la respiration cellulaire qui entre en jeu dans le cadre du métabolisme des levures.

Les cellules sont le siège de la chaîne de réactions qui permet de produire l'énergie dont l'organisme a besoin. Plus précisément, la respiration est l'une des voies métaboliques qui assure la régénération de l'ATP, de petites molécules non stockables dont le potentiel chimique est capable d'alimenter instantanément en énergie la plupart des réactions biologiques.

La respiration s'apparente chimiquement à une combustion des nutriments, jouant le rôle de donneurs d'électrons (réducteur), en présence d'un accepteur d'électrons (oxydant).

En dehors de la respiration aérobie qui utilise l'oxygène moléculaire comme oxydant inorganique, il existe des respirations anaérobies qui utilisent une grande variété de substances comme accepteurs finaux d'électrons.

La fermentation constitue un autre type de voie métabolique avec un bilan positif de production d'ATP. Celle-ci ne se déroule pas au niveau des membranes mais directement dans le liquide cytoplasmique. La fermentation a un rendement énergétique moindre que la respiration.

18.6.g. Fermentation

Référence : [wikipédia](#)

La **fermentation** est un processus métabolique convertissant des glucides en acides, en gaz ou en alcools pour en extraire une partie de l'énergie chimique tout en ré-oxydant les coenzymes réduites par ces réactions. Il s'agit d'une voie métabolique d'oxydoréduction dans laquelle l'accepteur ultime d'électrons est souvent confondu avec le produit final des réactions. Elle se caractérise par une dégradation partielle de la substance fermentescible et ne permet qu'une production d'énergie limitée. Elle a lieu chez des

levures et des bactéries, ainsi que dans les cellules musculaires manquant d'oxygène, c'est-à-dire en conditions anaérobies.

Plus précisément, la fermentation est un mode de respiration cellulaire mettant en œuvre un système de transfert d'électrons reposant sur des petites molécules solubles du cytosol — souvent des acides organiques ou leurs dérivés.

Dans le cadre du brassage ce qui va nous intéresser c'est bien sur la fermentation alcoolique (voir chapitre sur la biochimie des levures).

18.7. Groupes fonctionnels

Référence : [wikipédia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_groupes_fonctionnels)

Les composés organiques peuvent être considérés comme constitués d'un squelette relativement non réactif appelé alcane parent et d'un ou plusieurs groupes fonctionnels. Un groupe fonctionnel est un atome ou un groupe d'atomes qui a des propriétés chimiques similaires chaque fois qu'il est présent dans des composés différents. Il définit des propriétés physiques et chimiques des familles des composés organiques.

La notation courante de la structure moléculaire est de symboliser le ou les groupes fonctionnels et d'indiquer le squelette substitutif par la lettre R, R', R'' (suivant le nombre de squelettes).

Ainsi R-OH désigne un alcool primaire avec le groupe fonctionnel hydroxyle (OH) et le squelette R.

Tableau 20 : Quelques groupes fonctionnels principaux (nomenclature IUPAC)

Groupe	Famille	Groupe	Formule	Préfixe	Suffixe	Exemples
Hydrocarbures	Aryle	Phényle	$R-C_6H_5$	phényl-		phénol
		Benzyle	$R-CH_2-C_6H_5$	benzyl-		phénylalanine
Oxygène	Alcool (hydroxyle)	Alcool primaire	$R-CH_2-OH$	hydroxy-	-ol	éthanol
		Alcool secondaire	$R,R'-CH-OH$			menthol
		Alcool tertiaire	$R,R',R''-C-OH$			linalol
	Composé carbonylé	Formyle	$R-C(=O)H$	formyl-	-carbaldéhyde -al	butanal
		Aldéhyde	$R[C](=O)H$	oxo-		
		Cétone	$R-[C](=O)-R'$	oxo-	-one	acétone
	Acide carboxylique	Benzoyle	$R-CO-C_6H_5$	benzoyl-		
		Carboxyle	$R-C(=O)-OH$ $R-[C](=O)-OH$	Carboxy-	Acide R-carboxylique Acide R-oïque	Acides aminés
	Ester		$R-C(=O)O-R'$	R-oxycarbonyl-	R-oate de R'-yle	Éthanoate de propyl
	Acétal	Acétal	$R-C(H)(O-R')(O-R'')$		R-al R'-yl R''-yl acétal	
Azote	Amine	Amine primaire	$R-NH_2$	amino-	-amine	Acides aminés
		Amine secondaire	$R-N(-H)-R'$			
		Amine tertiaire	$R-N-R',R''$			
Soufre	Thiol	Sulfhydryle	$R-SH$	Sulfanyl-	-thiol	ethanethiol
	Sulfure		$R-S-R'$		Sulfure de R-yle et de R'-yle	
	Disulfure		$R-S-S-R'$		Disulfure de R-yle et de R'-yle	
Oxygène et	Amide	Amide primaire	$R-C(=O)NH_2$	carbamoyl-	-carboxamide	Acides

Azote			$R-[C](=O)NH_2$		-amide	aminés
		Amide secondaire	$R-C(=O)-N(-R)-C(=O)-R'$			
		Amide tertiaire	$[R-C(=O)]_3N$			
Oxygène et Phosphate	Phosphate		$(RO), (R'O), (R''O)-P=O$			

Souvent les composés peuvent comprendre plusieurs groupes fonctionnels :

- Le phénol est constitué de
 - 1 groupe hydroxyle (-OH)
 - 1 groupe phényle (-C₆H₅).
- Un acide aminé est constitué de
 - 1 groupe carboxylique (-COOH ou plus précisément -C(=O)-OH)
 - 1 groupe amine (-NH₂ ou -N(-H)-)

18.7.a. Alcools

En chimie organique, un alcool est un composé organique dont l'un des atomes de carbone (celui-ci étant tétraédrique) est lié à un groupe hydroxyle (-OH). L'éthanol entrant dans la composition des boissons alcoolisées est un cas particulier d'alcool. Le méthanol et l'éthanol sont toxiques et mortels à haute dose.

On distingue souvent les alcools en classes :

- Alcools primaires, dont le carbone comportant le groupement OH est lié à 2 atomes d'hydrogène et un radical R ;
- Alcools secondaires, dont le carbone comportant le groupement OH est lié à 1 atome d'hydrogène et deux radicaux R et R' ;
- Alcools tertiaires, dont le carbone comportant le groupement OH est lié à trois radicaux : R, R' et R'' ;
- Phénols, considérés comme un alcool particulier le radical R est alors un cycle de 6 carbones.

Les alcools ont un point d'ébullition élevé, les plus courts sont solubles dans l'eau, la fonction hydroxyle OH permet une rupture ionique facile et ce sont donc des acides faibles.

Exemples : Méthanol, Éthanol, Propanol, Butanol, pentanol, hexanol, géraniol, linalol...

18.7.b. Aldéhydes et Cétones

Composés carbonylés dont un des carbones porte un groupement carbonyle.

Les aldéhydes et cétones diffèrent en ce que le lien carbone porteur du groupement carboxyle est primaire chez les aldéhydes et secondaires pour les cétones.

Les aldéhydes dérivent des alcools primaires par oxydation : perte d'un hydrogène et remplacement par un groupe R. On parle aussi d'alcool déshydrogéné.

Les cétones dérivent des alcools secondaires par oxydation.

Principaux aldéhydes : méthanal, éthanal, Propanal, Butanal, Pentanal, citral, citronellal

Principales cétones : propanone (acétone), butanone, menthone, camphre, thuyone...

18.7.c. Phénols et Polyphénols

Référence : [wikipédia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ph%C3%A9nol)

En chimie organique, les phénols sont des composés chimiques aromatiques (fonction phényle) portant une fonction hydroxyle -OH. Les dérivés portant plusieurs fonctions hydroxyles sont appelés les polyphénols.

Dans la nature, ce sont des alcools aromatiques produits par les végétaux. Les phénols simples, déchets du métabolisme végétal, sont assemblés en polyphénols comme la lignine.

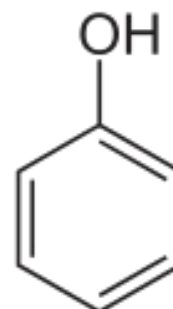


Figure 38: Phénol : groupe hydroxyle -OH

Quatre principales familles de composés phénoliques se distinguent : les acides-phénols, les flavones, les anthocyanes et les tanins.

Les phénols sont plus acides que les alcools. Cet acide est toutefois un acide relativement faible.

Les propriétés plus acides des phénols font en sorte qu'ils réagissent avec les bases fortes comme l'hydroxyde de sodium (NaOH), contrairement aux alcools. Cette propriété peut être utilisée pour séparer un mélange d'alcool et de phénol.

Le phénol le plus simple porte le nom de son groupe.

Polyphénols

Référence : [wikipédia](#)

Les polyphénols constituent une famille de molécules organiques largement présente dans le règne végétal. Ils sont caractérisés par la présence d'au moins deux groupes phénoliques associés en structures plus ou moins complexes, généralement de haut poids moléculaire. Ces composés sont les produits du métabolisme secondaire des plantes.

Les polyphénols naturels regroupent donc un vaste ensemble de substances chimiques comprenant au moins un noyau aromatique, portant *un ou plusieurs* groupes hydroxyle, en plus d'autres constituants.

Les polyphénols sont communément subdivisés Classes : phénols simples, acides phénoliques et coumarines, naphthoquinones, stilbénoides, flavonoides, isoflavonoides et anthocyanes, et en formes polymérisées. Ces squelettes carbonés de base sont issus du métabolisme secondaire des plantes.

Les polyphénols des végétaux ont diverses fonctions, ils apportent notamment des odeurs et goûts et surtout des couleurs.

- Tanins ((C₆-C₃-C₆)ⁿ) : astringence, hydrosoluble, précipite (formation de complexes) les protéines, alcaloïdes et polysaccharides. Surtout présent dans feuilles et écorces. Défense chimique contre les insectes et herbivores.
- Anthocyanes (C₆-C₃-C₆) : colorant naturel des pétales et des fruits allant du rouge orangé au bleu pourpre et antioxydant (cyanidine, delphinidine, pélargonidine, malvidine, péodindine...)
- Coumarines (C₆-C₃) : odeur de foin fraîchement coupé, c'est à la base une défense chimique des plantes contre les herbivores (couramine, ombelliférone, esculétol, scopolétol)
- Flavonoides (C₆-C₃-C₆) : responsable surtout de la couleur des fleurs et des fruits, découpé en sous-classes :
 - Flavones : colorant jaune, (flavone, lutéolol, apigénol...)
 - Flavonols : antioxydant, (kaempférol, quercétol, myricétol, fisétine...)
 - Flavanonols : (taxifoline, aromadédrine, chrysandrosides...)
 - Flavanones : (ériodictyol, naringinine, isosakuranétine, pinocembrine...)
 - Aurones : couleur jaune de certaines fleurs et antioxydant (hispidol, aureusidine)
 - Chalcones : antibactérien, antifongique, précurseur de tout les flavonoides (butéine, xanthohumol)
 - Dihydrochalcone (phlorétine, naringine dihydrochalcone)

18.7.d. Terpènes

Référence : [wikipédia](#)

Les terpènes sont une classe d'hydrocarbures produits par de nombreuses plantes, en particulier les conifères (composant majeur de la résine). Il s'agit d'un polymère d'isoprène (C₅H₈), soit (C₅H₈)_n

Les terpènes présentent généralement des propriétés odoriférantes chez les végétaux et interagissent avec la lumière (en faisant des colorants).

On trouve :

- n=1 (C₅H₈) : isoprène, **exemple**
- n=2 (C₅H₈)₂ : monoterpènes, **exemple**
- n=3 (C₅H₈)₃ : sesquiterpènes, **exemple**
- n=4 (C₅H₈)₄ : diterpènes, **exemple**
- etc.

Familles principales :

- Alpha-pinène (menthe, lavande, sauge et gingembre)
- Beta-pinène : odeur de sapin (conifères, cumin, romarin, persil, basilic, achillée mille-feuille, rose)
- Terpinéol (ou terpinols), alcool monoterpéniques, présent dans l'huile essentielle de pin, mais aussi lavande, genévrier, livèche et marjolaine notamment.
- Linalol, alcool tertiaire terpinique, présent dans une majorité d'huile essentielle (lavande, bergamote, bois de rose, menthe...)
- 3-carène (térébenthines, poivre noir, citrus)
- Limonène : odeur fraîche d'orange (agrumes, eucalyptus, menthe poivrée)
- Carotène et caroténoïdes (lutéine, lycopène) : pigment de couleur orange ou jaune (carotte, poivron, épinard, laitue, tomate, courge, abricot...)
- Terpénoïdes : contribuent au parfum de l'eucalyptus, de la cannelle, du clou de girofle ou du gingembre par exemple. Les plus connus : citral, menthol, camphre et cannabinoïdes...

18.7.e. Amines

Composés organiques dérivés de l'ammoniac, dont au moins un atome d'hydrogène a été remplacé par un groupe carboné. Si l'un des atomes de carbone lié à l'atome d'azote fait partie d'un groupe carboxyle, c'est alors un amide.

C'est la base des acides aminés et source d'influence de la structure 3D des protéines.

Amides

Composé organique dérivé d'un acide carboxylique, groupe très important en biochimie car responsable de la liaison peptidique entre les différents acides aminés qui forment les protéines.

Acides aminés

C'est un acide carboxylique qui possède également un groupe fonctionnel aminé. Dans le monde du vivant on connaît environ 500 acides aminés, dont environ 149 présents dans les protéines.

Il existe 22 acides aminés dits protéinogènes, dont 9 sont qualifiés d'essentiels pour l'homme, car ils ne peuvent être produits par notre métabolisme (leur source est donc l'alimentation).

Tableau 21: Les 22 acides aminés protéinogènes

Désignation	Abréviation	Essentielles (dose journalière recommandées mg/kg)	Structure	Polarité
Alanine	A		Aliphatique	apolaire
Arginine	R	x		positive
Asparagine	N			apolaire
Aspartate	D			négatif
Cystéine	C	x		négatif
Glutamate	E			négatif
Glutamine	Q	x		apolaire
Glycine	G	x	Aliphatique	
Histidine	H	10	Aromatique	positive
Isoleucine	I	20	Aliphatique ramifiée	
Leucine	L	39	Aliphatique ramifiée	
Lysine	K	30		positif
Méthionine	M	15	Aliphatique	
Phénylalanine	F	25	Aromatique	
Proline	P	x	Aliphatique	apolaire

Pyrrolysine	O			positive
Slénocystéine	U			négatif
Sérine	S			apolaire
Thréonine	T	15		apolaire
Tryptophane	W	4	Aromatique	
Tyrosine	Y	x	Aromatique	négatif
Valine	V	26	Aliphatique raméfiée	apolaire

Biomasse terrestre :

cellulose : 30 à 50 %

hemicellulose (30 à 40%)

lignine (15 à 25%)

Tanin

https://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle_de_Krebs

https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9action_de_Maillard

https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9action_d%27oxydor%C3%A9duction

https://fr.wikipedia.org/wiki/Oxydor%C3%A9duction_en_chimie_organique

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Photosynth%C3%A8se>

https://fr.wikipedia.org/wiki/Respiration_cellulaire

https://fr.wikipedia.org/wiki/Oxydation_de_Swern

18.8. Acide et base

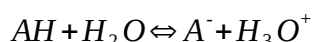
Les réactions acides-bases en solution sont basées sur des couples d'espèces chimiques. L'acidité et la basicité peuvent être calculées ou mesurées par la concentration des espèces chimiques en solution, qui prennent une forme acide ou basique.

Svante Arrhenius a mis en évidence dans les solutions aqueuses l'échange de protons entre les composés chimiques, la concentration en ion hydronium (H_3O^+ ou H^+ aqueux) indique l'acidité du milieu comme la concentration en ion hydroxyde (OH^-) la basicité.

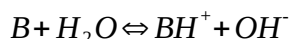
Acidité en solution aqueuse

L'acidité d'une solution se mesure avec le pH (voir le chapitre [unité de mesure](#)) qui est la concentration en ion H^+ sur une échelle logarithmique.

Un acide A ($pH < 7$) agit dans une solution aqueuse en produisant la réaction suivante :



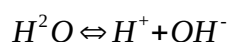
Une base B ($pH > 7$) agit dans la solution aqueuse en produisant la réaction suivante :



Un acide fort (ou une base forte) est donnée comme étant un composé dont la réaction est totale (équation ci-dessus) ; par opposition un acide faible (ou base faible) indique que la réaction est partielle.

Équilibre H^+ / OH^-

La somme des concentrations H^+ et OH^- reste constante.



Une substance qui donne facilement des H^+ ou absorbe facilement des OH^- est dite un acide ($pH < 7$).

À l'inverse une substance qui donne des OH^- ou absorbe des H^+ est dite une base ($pH > 7$).

Tampon (effet tampon)

Les acides faibles, base faibles et sels agissent comme des tampons, des retardateurs lors qu'un changement de pH se produit. Ce fonctionnement est du à des réactions chimiques qui transforment une

partie de ces composants pour tenter de garder la solution équilibrée. Lorsque ces composants viennent à manquer, l'effet tampon disparaît et le changement de pH se produit réellement.

Le bicarbonate est par exemple un tampon dans une solution d'eau potable et nous intéresse fortement dans l'équilibre chimique de la maische durant l'empâtage.

19. Introduction à la chimie de l'eau

Référence : [wikipédia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Eau), aquatech

L'eau est une substance chimique constituée essentiellement de molécules H_2O . Ce composé est très stable et néanmoins très réactif, et l'eau liquide est aussi un excellent solvant. L'eau est un constituant biologique important, essentiel sous sa forme liquide pour tous les organismes vivants connus.

L'eau pure n'existe pas naturellement et l'eau courante est toujours une solution d'eau, de sels minéraux et d'impuretés.

L'eau est le composé le plus présent dans la bière (environ 75 à 85 %) et elle a une grande importance dans les processus biochimiques qui vont se déroulent pendant le brassage. Pour le brassage il faut utiliser, bien sur, de l'eau potable. L'eau de brassage aura aussi une influence sur l'équilibre chimique de la maïsche (notamment son acidité) et pourra mettre en valeur certaines saveurs de la bière.

19.1. Propriétés de l'eau pure

L'eau pure est composée de molécules H_2O , mais aussi d'ions résultants de l'autoprotolyse :

$2 \cdot H_2O \rightleftharpoons H_3O^+ + OH^-$. L'autoprotolyse de l'eau s'équilibre suivant l'acidité de la solution.

19.1.a. Caractéristiques principales

- Masse molaire : 18,01 g/mol
- Température de fusion :
 - 0 °C au niveau de la mer (pression 1,0 atm)
- Température d'ébullition :
 - 100 °C au niveau de la mer (0 m, 1,0 atm)
 - 83,9 °C au sommet du Mont-Blanc (4 800 m, 0,547 atm)
- Masse volumique :
 - 1,000 kg/m³ à 4 °C
 - 0,997 kg/m³ à 25 °C
- Conductivité thermique : 0,604 W/m/K à 20 °C
- Capacité thermique massique : 4 186 J/kg/K
- Tension superficielle : 0,728 N/m à 20 °C

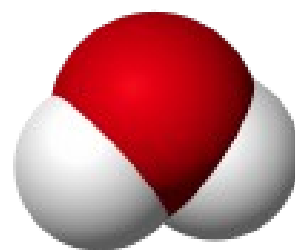


Figure 39: Molécule H_2O

19.1.b. Propriétés liées à la vie

- Les liaisons hydrogènes donnent à l'eau une **forte cohésion** qui lui permet d'être en phase liquide sur une large plage de températures et d'être un bon solvant.
- Ses propriétés de **solvant** « doux » permet à un grand nombre de réactions chimiques de s'y dérouler.
- Le fait que la **densité de l'eau** soit maximale à 4 °C et plus légère en dessous, permet à l'eau solide de flotter sur l'eau liquide et que au fond des lacs la température descend rarement au-dessous de 4 °C, permet à la vie de s'y maintenir.
- Sa **tension superficielle** particulièrement élevée permet le phénomène de capillarité, particulièrement important pour les végétaux. Mais aussi permet à de nombreuses formes de vie de se déplacer à sa surface.

19.2. Eau pour le brassage

Pour le brassage vous devrez utiliser beaucoup d'eau. On peut différencier les usages nécessitant une eau potable (pour la bière proprement dite) et les usages de nettoyages.

Vous aurez le choix entre plusieurs sources d'approvisionnement :

- **Eau courante** (ou eau du robinet), c'est l'eau disponible à votre maison et mise à disposition par votre commune. C'est celle que vous utiliserez en général.
- Eau de source ou Eau minérale, c'est de l'**eau en bouteille** achetée en magasin.
- **Eau distillée**, c'est une eau qui étant distillée ne contient plus aucun minéral, elle n'est pas utilisable directement pour le brassage. C'est une eau qui faut « **reconstruire** » en lui apportant les minéraux nécessaires.
- **Source locale**, vous pouvez éventuellement disposer d'une source à côté de chez vous, toutefois il est dans ce cas important de faire analyser l'eau pour en vérifier la potabilité, ce qui n'est pas simple et coûteux, car il faut le faire souvent.
- **Eau de pluie**, il s'agit d'eau de récupération et elle n'est pas considérée comme potable, de plus sa minéralité est très faible la rendant inutile, voire **dangereuse pour le brassage**. Elle peut être utilisée pour le **nettoyage**.

19.2.a. Cycle de l'eau

L'eau courante ou de source est toujours une eau provenant originellement du sous-sol (puits, pompage, source...), qui a suivi souvent un très long parcours.

Le cycle de l'eau commence dans les nuages (sous forme de vapeur ou de gouttelettes) puis se précipite sous forme de pluie. L'eau s'infiltre ensuite dans la terre et les roches en profondeur. Se forme alors au fil du temps des poches qui deviendront notre eau potable. Cette eau s'écoule en surface (sous forme de rivière le plus souvent) et finit sa course dans les océans. Pendant ce chemin en surface, une partie s'évapore dans l'atmosphère et formera, à nouveau, des nuages.

Au cours de ce long voyage l'eau va se charger en sels minéraux correspondant au profil géologique des zones traversées ; c'est ce profil géologique qui donnera le profil de la bière, suivant sa charge minérale. Les régions granitiques (le granit se dissout peu ou pas) donneront une eau peu minéralisée alors que les régions calcaires (le calcaire se dissout très bien) donneront une eau très chargée.

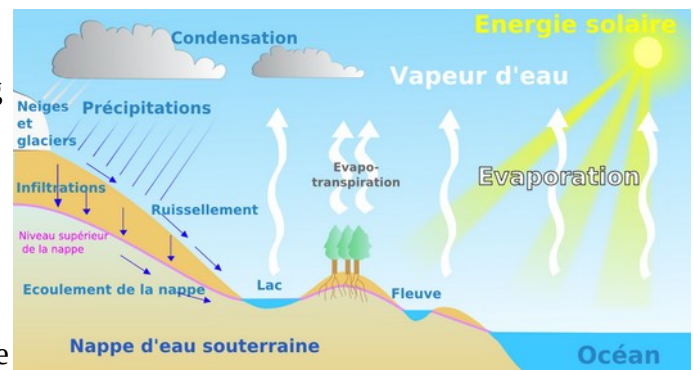


Figure 40: Cycle de l'eau / source : wikipedia.fr

19.2.b. Eau courante

Référence : [wikipedia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle_de_l'eau)

Cette eau, qui s'écoule de nos robinets domestiques, présente l'avantage d'être très peu cher et disponible en quantité. Sa composition (minéralité) est dépendante du territoire et peut être très variable suivant les lieux. Cette eau est aussi très contrôlée et parfaitement potable, par contre elle contient souvent du Chlore (pour garantir sa parfaite désinfection) que l'on peut toutefois facilement retirer en laissant l'eau reposer à l'air libre pendant une nuit (le chlore s'évapore très facilement) ou plus rapidement en agitant.

En France les services de distribution d'eau potable proposent des fiches d'analyse très complètes qui permettent de connaître parfaitement la composition de l'eau distribuée et notamment des charges minérales.

Traitements de l'eau courante

Les eaux du robinet sont pré-traitées pour en assurer la potabilité. Les principaux traitements visent à éliminer les organismes vivants (bactéries) et les polluants éventuels. Le pré-traitement principal reste le chlore qui apporte une odeur et un goût caractéristique.

Attention : L'utilisation d'un adoucisseur d'eau rend l'eau impropre à faire une bière correcte (la présence de minéraux est indispensable et la charge Sodium devient trop importante).

19.2.c. Eau de source

Référence : [wikipédia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Eau_de_source)

Une **eau de source** est une catégorie d'eau embouteillée dont les caractéristiques doivent respecter une réglementation qui varie selon les pays. En général, elle doit être d'origine souterraine, ayant bénéficié d'une protection contre la pollution, et n'ayant subi ni traitement chimique, ni adjonction. Elle doit donc être naturellement conforme aux critères de potabilité.

La composition minérale est indiquée, mais pas toujours très complète.

19.2.d. Eau minérale naturelle

Référence : [wikipédia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Eau_min%C3%A9rale_naturelle)

L'**eau minérale naturelle** est une catégorie d'eau dont les caractéristiques sont définies réglementairement. Obligatoirement d'origine souterraine (qu'on la capte via un forage ou qu'elle jaillisse d'une source), elle doit avoir une composition chimique stable et ne pas avoir besoin d'être désinfectée pour être consommée. Elle peut cependant recevoir des traitements visant à la débarrasser de certains composés toxiques ou non souhaitables.

Ce qui en fait une eau moins « naturelle » que l'eau de source malgré sa dénomination... Ce type d'eau a une composition minérale connue et peut être utilisé pour certains styles de bière, mais son coût est prohibitif.

19.3. Usage de l'eau pendant le brassage

L'eau pendant le brassage va servir à plusieurs choses (estimation pour des brassins de 20 à 30 litres) :

- Nettoyage : de 7 à 15 litres par litre de bière :
 - Nettoyage et rinçage des cuves et instruments
 - Refroidissement du moût
- Fabrication du moût : 2 litres par litre de bière
 - Eau incorporée dans la maische (avec perte)
 - Eau de rinçage de la maische (avec perte)
 - Perte à l'ébullition et aux transferts

Ce qui fait une consommation totale pouvant varier de 9 à 17 litres d'eau pour 1 litre de bière suivants les procédés employés. La majorité étant utilisée pour le nettoyage et le refroidissement. Non seulement la bière contient beaucoup d'eau, mais il faut beaucoup d'eau pour en fabriquer.

À noter que les brasseurs industriels arrivent à optimiser leurs procédés pour n'utiliser de 4 litres d'eau pour fabriquer 1 litre de bière.

19.4. Paramètres de l'eau de brassage (profil)

L'eau est composée d'un mélange d'eau, de gaz dissous et de minéraux, c'est cet équilibre qui influe sur les caractéristiques de la maische et de la bière finale. En brassage on parle de « profil de l'eau de brassage ».

Les minéraux de l'eau (sels minéraux) de brassage auront 2 effets sur la bière :

- En liaison avec les malts, cela définira l'acidité (pH) de la maische et donc le fonctionnement optimal de l'empâtage (voir chapitre [Empâtage](#))
- Mettre en valeur certains goûts de la bière finale, notamment l'équilibre houblon/malt et la minéralité de la bière finale

19.4.a. Connaître le profil de l'eau du robinet d'une commune (en France)

Pour optimiser son brassin et sa bière il est donc important de connaître le profil de son eau de brassage. En France on peut connaître assez facilement la composition exacte de l'eau du robinet d'une commune sur le site internet « [Qualité de l'eau potable \(ministère de la santé\)](#) ».

- Choisir sa région
- Choisir son département, commune et réseau (parfois les grandes communes peuvent avoir plusieurs réseaux de distribution)
- Ceci permet d'accéder au dernier rapport de potabilité.
 - À partir d'ici on pourra remonter le temps pour consulter les rapports précédents (bouton précédent) et trouver le dernier rapport de minéralité.
 - Il faut parcourir les derniers rapports pour trouver celui complet comprenant les concentrations des minéraux (calcium, magnésium, carbonates...) car ils ne sont pas mesurés à chaque fois ; il faut parfois remonter sur 1 an car l'analyse minérale n'est pas très souvent faite de manière complète (car souvent très stable) ;
 - Le lieu de mesure est indiqué pour chaque rapport (souvent un lieu public : école ou mairie) ainsi que la date et l'heure
 - On pourra consulter plusieurs rapports minéraux pour voir si les concentrations sont stables.
 - pH, c'est l'acidité de l'eau (peu important car sera complètement modifié par l'ajout des malts) ;
 - Titre hydrotimétrique, taux des ions Calcium et Magnésium, c'est la dureté totale (que l'on peut contrôler par calcul, voir plus bas) ;
 - Titre alcalimétrique complet (TAC), taux d'hydroxydes en °f, c'est aussi l'alcalinité totale (que l'on peut contrôler par calcul, voir plus bas) ;
 - Sulfates, les ions SO_4 en mg/l ;
 - Chlorures, les ions Cl en mg/l ;
 - **Magnésium**, les ions Mg en mg/l ;
 - Potassium, les ions P en mg/l ;
 - **Calcium**, les ions Ca en mg/l ;
 - **Hydrogénocarbonates**, les ions HCO_3 en mg/l.

On peut aussi consulter son distributeur d'eau ou l'[Ministère de la Santé \(Eau\)](#) (Agence Régionale de Santé qui gère ces analyses) de sa région qui pourra fournir un rapport encore plus détaillé.

Un site internet très bien fait permet de mettre en forme simple et graphique les profils d'eau de chaque commune Française (en se basant sur les données publiques) : moneaudebrassage.fr

Pour analyser le rapport il faut bien veiller aux unités utilisées pour exprimer les concentrations et titres (voir les paragraphes [concentration](#) et [titre](#) du chapitre unité). Dans les analyses de l'ARS (France) :

- Ions minéraux : de mg/l à ppm, sans conversion c'est identique (1 L d'eau = 1 kg)
- Titre : 1°f = 10 ppm équivalent CaCO_3

19.4.b. Chimie des minéraux de l'eau

Les sels minéraux sont des éléments chimiques qui entrent dans la composition des organismes et qui sont présents dans l'alimentation animale et végétale. Ils se présentent sous forme ionique (anions ou cations), comme Ca^{2+} pour le calcium et Cl^- pour le chlore. Ce sont des substances indispensables à l'organisme.

Ces éléments indispensables à la vie sont finement régulés par les organismes pour maintenir le taux adéquat. Les carences peuvent entraîner des dysfonctionnements importants. Des surabondances sont régulées par élimination, mais lorsque les taux deviennent trop importants les mécanismes de régulation deviennent inopérants et entraînent à leur tour des dysfonctionnements.

19.4.c. Minéraux importants

Les minéraux présents dans l'eau sont issus de la minéralisation de l'eau lors de son passage au travers des terres et roches durant son long voyage depuis la pluie initiale à la résurgence en source. Durant se

voyage les eaux se chargent plus ou moins en minéraux (sous forme d'ions) arrachés aux roches. Leur quantité totale est très faible mais très importante pour la vie et pour la future bière.

Attention à l'utilisation des unités pour les concentrations et calculs, voir la partie « [Chimie / Concentration](#) ».

Les minéraux présents dans l'eau le sont rarement sous leur forme pure et sont très souvent associés entre eux, même temporairement. Ainsi par exemple Na^+ et HCO_3^- peuvent s'associer pour former du bicarbonate de sodium (bicarbonate de soude) NaHCO_3 ; dans ce cas Na^+ et HCO_3^- ne sont plus considéré comme « libre ».

Dans la liste ci-après, la masse molaire est exprimée en g/mol (masse d'une mole de cet élément) ; Eq c'est le poids équivalent, soit la masse molaire divisée par le poids électrique ; le taux recommandé correspond à la concentration recommandée pour l'eau de brassage suivant le style de bière.

Calcium

Symbole : Ca^{2+}	Masse atomique : 40	Eq : 20	Taux recommandé : 50 à 150 ppm
--	---------------------	---------	--------------------------------

- Brassage : C'est l'ion le plus important du brassage, c'est un cofacteur de beaucoup de réactions chimiques au cours du brassage.
 - Diminue le pH en compensant l'alcalinité des bicarbonates
 - Aide à stabiliser les enzymes amylases à hautes températures et permet une meilleure conversion.
 - Précipite les acides oxaliques du malt.
 - Améliore la limpidité de la bière en améliorant la floculation des levures : en permettant une meilleure interaction des levures entre-elle, ce qui permet la formation d'agglomérat qui peuvent mieux sédimenter.
 - Réduit le pH de la maïsche en réagissant avec les phosphates du malt.
- Chimie : Détermine majoritairement la dureté de l'eau (66 %). Une partie sera neutralisée par les bicarbonates.
- Biochimie : Métal le plus présent dans le corps humain, essentiellement dans les os, dents. À un rôle important dans la contraction des muscles.

Magnésium

Symbole : Mg^{2+}	Masse atomique : 24,3	Eq : 12,15	Taux recommandé : 5 à 40 ppm
--	-----------------------	------------	------------------------------

- Brassage :
 - C'est l'ion partenaire du Calcium, participe aux mêmes réactions durant le brassage mais a moindre importance.
 - Nutriments vitaux des levures (aussi présent dans le malt). Une concentration supérieure à 50 ppm va apporter un goût « acide (sour) ».
- Chimie : Détermine minoritairement la dureté de l'eau (33 %).
- Biochimie : Impliqué dans toutes les étapes de transport d'énergie, intervient dans plus de 400 réactions biologiques.

Bicarbonates (hydrogénocarbonate)

Symbole : HCO_3^-	Masse molaire : 61,0	Eq : 61,0	Taux recommandé : Blondes : 0 à 50 ppm Ambré : 50 à 150 ppm Brunes : 150 à 250 ppm
--	----------------------	-----------	---

- Brassage :
 - Augmente le pH de la maïsche et neutralise l'acidité des malts foncées.
 - C'est le paramètre sur lequel le brasseur essayera de jouer pour équilibrer sa maïsche à l'acidité optimale.
 - C'est cet ion qui influence le plus l'alcalinité de la maïsche. Une partie sera neutralisée par le calcium et le magnésium.

- Chimie : Dans l'eau, le dioxyde de carbone, l'acide carbonique, l'ion bicarbonate et l'ion carbonate sont en équilibre en fonction du pH (ion H⁺). Voir paragraphe suivant pour une explication détaillée.

Sulfate

Symbole : SO₄²⁻	Masse molaire : 96,0	Eq : 48,0	Taux recommandé : 50 à 150 ppm 150 – 400 ppm (Pale Ale et IPA)
--	----------------------	-----------	---

- Brassage :
 - Accentue l'amertume des houblons. Voir le paragraphe [ratio chlorure/sulfate](#).

Chlorure

Symbole : Cl⁻	Masse molaire : 35,4	Eq : 35,4	Taux recommandé : 50 à 150 ppm
---------------------------------	----------------------	-----------	--------------------------------

- Brassage :
 - Accentue le parfum des bières, notamment des malts.
 - Met en avant le corps et la douceur des malts.

Sodium

Symbole : Na⁺	Masse molaire : 22,9	Eq : 22,9	Taux recommandé : 0 à 100 ppm
---------------------------------	----------------------	-----------	-------------------------------

- Brassage :
 - Accentue la rondeur des malts et la sensation du corps
 - Peu avoir un goût métallique avec d'autres ions comme le calcium.
- Biochimie : Le couple Sodium-Potassium forme une pompe pour les cellules vivantes, permet l'entrée ou la sortie d'éléments.

Phosphate

Symbole : PO₄³⁻	Masse molaire : 95,0	Eq : 31,7	
--	----------------------	-----------	--

- Sers de support au stockage d'énergie (ATP/ADP), intervient dans le bon fonctionnement des levures.

Potassium

Symbole : K²⁺	Masse molaire : 39,1	Eq : 39,1	
---------------------------------	----------------------	-----------	--

- Biochimie : Le couple Sodium-Potassium forme une pompe pour les cellules vivantes, permet l'entrée ou la sortie d'éléments.

Souffre

Symbole : S²⁻	Masse molaire : 32,1	Eq : 16,0	
---------------------------------	----------------------	-----------	--

- À un rôle essentiel dans la structure des protéines et enzymes.

19.4.d. Paramètres globaux (analyse d'un rapport d'eau)

pH ou l'acidité

Voir la définition au chapitre « [Chimie Acidité](#) »

Le pH de l'eau a peu d'effet, ce qui compte c'est le pH de la maische (mélange eau+céréales) pendant le brassage car c'est ce pH qui rendra plus ou moins facile le travail des enzymes. Les eaux sont majoritairement et par nature plutôt neutre (autour de pH=7).

- Le pH classique de l'eau est en général compris entre 7 et 8.
- Le pH du brassin idéal (maische) est idéalement compris entre 5,5 et 5,8 (à température ambiante)
- Le pH d'une bière finie est généralement compris entre 4 et 5

Les céréales feront baisser le pH (acidification).

Dureté ou minéralité

Référence : [wikipédia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Dureté_de_l'eau)

La dureté totale de l'eau (ou titre hydrotimétrique, TH) est un indicateur de la minéralisation de l'eau, qui est relatif uniquement aux ions Calcium (Ca^{2+}) et Magnésium (Mg^{2+}) ; très dépendant du terroir où est puisé l'eau (profil géologique).

La dureté est mesurée en ppm de CaCO_3 (c'est-à-dire le potentiel de CaCO_3 qui pourra se former) et représentant la somme des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} .

Parfois la mesure est indiquée en degré français ($^{\circ}\text{f}$ ou $^{\circ}\text{fH}$) avec la relation suivant :

- $1^{\circ}\text{fH} = 10 \text{ mg/L de } \text{CaCO}_3$

Dureté des eaux en France

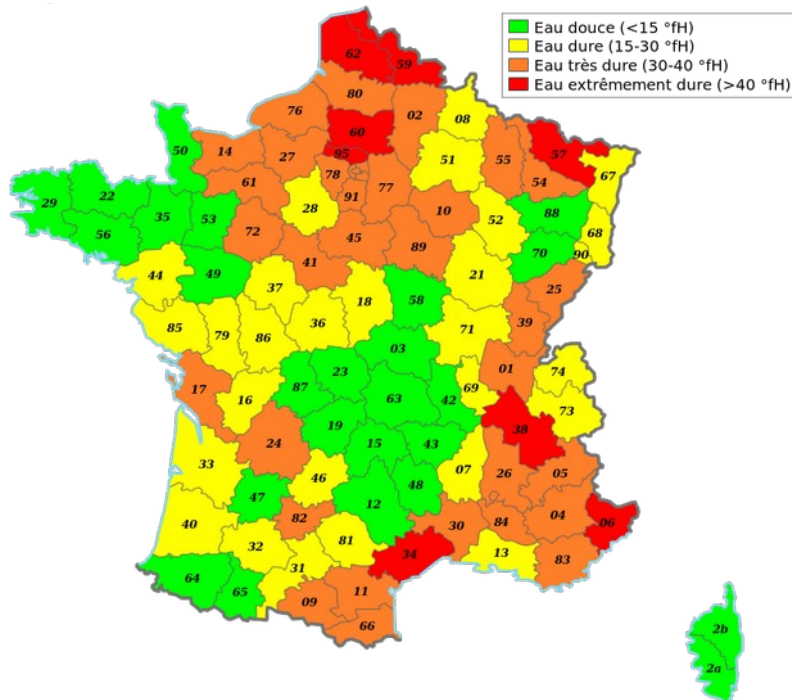


Figure 41: Dureté de l'eau en France

TH ($^{\circ}\text{f}$)	mg/l (ppm)	Eau
< 15	< 150	Douce
15 - 30	150 - 300	Plutôt dure
30 - 40	300 - 400	Dure
> 40	> 400	Très dure

Les duretés

On distingue 3 duretés : totale (TH), permanente (PH) et temporaire (KH) :

- **Dureté totale (TH)** : une mesure du Calcium et Magnésium total présent dans l'eau ; souvent indiqué dans les rapports.

Par définition : $TH = KH + PH$

Le calcul ci-dessous permet de vérifier la validité des données ioniques. Attention aux unités d'expression des concentrations (mol/L ou ppm CaCO_3).

$$TH_{\text{mol/l}} = (Ca_{\text{mol/l}} + Mg_{\text{mol/l}}) \quad , \text{ soit :}$$

$$TH_{\text{ppm } \text{CaCO}_3} = 100,0 \times \left(\frac{Ca_{\text{ppm}}}{40,0} + \frac{Mg_{\text{ppm}}}{24,3} \right)$$

- **Dureté temporaire (KH)** : C'est le pouvoir tampon qui pourra s'opposer (partiellement) à une acidification de la solution. Ce sont les ions Calcium et Magnésium « libres » qui pourront

s'associer aux ions bicarbonates. C'est un paramètre fondamental pour comprendre son eau de brassage.

- Si elle n'est pas donnée par l'analyse, on peut la calculer à partir des concentrations calcium et magnésium. C'est *Paul Kolbach* qui en 1953 a déterminé expérimentalement que 3,5 unités d'ions calciums réagissent avec les ions phosphates du malt pour relâcher 1 unité d'ions hydrogène qui pouvait « neutraliser » 1 unité d'alcalinité. Les ions magnésiums font de même mais sont moins réactifs et le coefficient de réaction est 7. Cette « neutralisation » se produit sans catalyseur et sans palier spécifique. Cette équation a été formulée avec un moût de densité 1,048 et une maische à 5 l/kg. Les coefficients peuvent varier suivant le ratio eau/grain et suivant les malts utilisés.

$$KH_{\text{mol/l}} = \frac{Ca_{\text{mol/l}}}{3,5} + \frac{Mg_{\text{mol/l}}}{7},$$

avec les concentrations généralement exprimées en ppm (mg/l) on

$$a \quad KH_{\text{mol/l}} = \left(\frac{[Ca]_{\text{mg/l}}}{40 \times 3,5} + \frac{[Mg]_{\text{mg/l}}}{24,3 \times 70} \right) = \frac{[Ca]_{\text{mg/l}}}{70} + \frac{[Mg]_{\text{mg/l}}}{85,05};$$

avec KH exprimé en équivalent CaCO_3 on a finalement :

$$KH_{\text{ppm CaCO}_3} = 100 \times \left(\frac{Ca_{\text{ppm}}}{70} + \frac{Ca_{\text{ppm}}}{85,05} \right) = \frac{Ca_{\text{ppm}}}{0,7} + \frac{Ca_{\text{ppm}}}{0,8505}$$

- Dureté permanente (PH)** : la différence entre TH et KH, ce sont les ions Calcium et Magnésium non libres, plutôt associés à des sulfates et chlorures et qui n'ont aucun pouvoir tampon. N'étant pas libre ils ne réagissent pas chimiquement en conditions normales.

Alcalinité

Référence : [wikipédia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Alcalinit%C3%A9)

L'alcalinité c'est la quantité d'acide nécessaire pour ramener la solution au second point d'équilibre (pH=4,3). Voir plus de détails dans le chapitre « [Chimie de l'eau](#) », paragraphe « [pouvoir tampon des bicarbonates](#) ».

L'alcalinité totale (TAC) c'est la somme des charges des bases faibles (carbonates, bicarbonates et hydroxydes) : $TAC = 2 \cdot [CO_3^{2-}] + [HCO_3^-] + [OH^-]$, dans la réalité d'une maische on peut négliger CO_3^{2-} et OH^- , qui n'apparaissent qu'à partir de pH > 8,3. Soit : $TAC = [HCO_3^-]$

En France, le TAC est exprimé en °f ; il peut aussi être exprimé en ppm équivalent CaCO_3 ($\text{ppm}_{\text{CaCO}_3}$), avec 1 °f = 10 $\text{ppm}_{\text{CaCO}_3}$.

Dans la maische, on a vu que le seul ion acide présent est le bicarbonate (HCO_3^-) ; pour convertir en potentiel de CaCO_3 ceci correspond à la réaction : $2 \cdot HCO_3^- + Ca^{2+} \Rightarrow 2 \cdot H^+ + CaCO_3$. Il faut donc 2 moles de HCO_3^- pour obtenir 1 mole CaCO_3 , d'où la conversion : 1 $\text{CaCO}_3 = 2 HCO_3^-$, qui converti en concentration molaire donne : 100 g de CaCO_3 provient de ($2 \times 61 \text{ g} = 122 \text{ g}$) de HCO_3^-

$$TAC_{\text{CaCO}_3} = \frac{[HCO_3^-]_{\text{mg/l}}}{1,22} \quad \text{ou} \quad TAC_{\text{°f}} = \frac{[HCO_3^-]_{\text{mg/l}}}{12,2}$$

L'alcalinité est une notion proche de la basicité (inverse de l'acidité) mais au lieu d'indiquer une situation de la solution, c'est un potentiel. L'alcalinité c'est donc aussi une mesure du pouvoir tampon de cette eau, donc de sa capacité à résister à l'ajout d'un composé acide. Voir le paragraphe [Équilibre d'acidité](#) plus bas pour plus de détails sur l'acidité de la maische.

La mesure réelle est effectuée en laboratoire par titrage avec un acide fort, Au fur et à mesure du titrage, le pH diminue, et on rencontrera 2 points d'équivalence.

- Le premier point correspond à un pH=8,3 ; ou les ions carbonates (CO_3^{2-}) se transforment en ions bicarbonates (HCO_3^-)
- Le second correspond à un pH=4,3 ; ou les bicarbonates (HCO_3^-) se transforment en acide carbonique (CO_2)

Alcalinité résiduelle (RA)

On distingue l'alcalinité totale (TAC) de l'alcalinité résiduelle (RA). Celle-ci correspond à l'alcalinité qui ne sera pas neutralisée par les ions calciums et magnésiums libres (voir [dureté temporaire](#) plus haut).

Pour le brassage c'est cette dernière qui nous intéresse principalement, car c'est une indication de l'évolution du pH que l'eau va apporter à la maische. L'eau contient des ions calcium et magnésium ceux-ci interagissent avec les bicarbonates et donc seul RA nous intéressera.

On a $RA = TAC - KH$

Par calculs :

$$RA_{\text{ppmCaCO}_3} = TAC_{\text{ppmCaCO}_3} - KH_{\text{ppmCaCO}_3} = \frac{[HCO_3^-]_{\text{mg/l}}}{1,22} - \left(\frac{[Ca]_{\text{mg/l}}}{70} + \frac{[Mg]_{\text{mg/l}}}{85,05} \right)$$

C'est un concept important du brassage qui permet d'appréhender le pH de la maische.

Une valeur $RA > 0$ augmente le pH de la maische.

Équilibre ionique (E_{ion})

La somme des concentrations en cations (ions +) et anions (ions -) est toujours neutre (0) dans l'eau.

Effectuer la somme à partir du rapport d'eau de tous les ions permet de s'assurer que tous les ions y sont, le total (pondéré par les signes) doit être inférieur à 0,1 pour le rapport soit considéré comme « complet » ou « utilisable ».

Ratio Sulfates/Chlorures (R_{sc})

Ce ratio permet d'évaluer l'équilibre entre la mise en valeur des houblons (Sulfates) et des malts (Chlorures). Il est généralement souhaitable de rester dans le ratio 0,5 à 5,0 (certaines IPA peuvent supporter plus).

$$R_{\text{sc}} = \frac{SO_4}{Cl} \quad , \text{ les unités importent peu, pourvu que ce soient les mêmes pour les 2 concentrations.}$$

Tableau 22: Table des ratios Sulfates/Chlorures et des styles recommandés

R_{sc}	< 0,4	0,4 à 0,6	0,6 à 0,8	0,8 à 1,5	1,5 à 2,0	2 à 4	4 à 9	> 9
Indication	Trop malté	Très malté	Malté	Équilibré	Légèrement amer	Amer	Très amer	Trop amer
Style (exemple)		German Lager	Stout			Pale Ale	Indian Pale Ale (IPA)	

Total des minéraux dissous (TMD ou TDS)

La somme des minéraux permet d'avoir la TDS qui est un indicateur de la charge minérale totale. Cette charge a un effet sur la perception de la bière.

$$TDS = \sum_{i=1}^n C_{\text{ppm}}(i)$$

Cette somme doit être réalisée dans la même unités et de préférence tout en ppm.

TDS :

- Trop faible (< 100 ppm) la bière pourra avoir goût de « bière diluée à l'eau » (goût de flotte) ;
- Trop élevé (> 800 ppm) la bière pourra avoir un goût trop minéral un peu trop prononcé.

C'est un simple indicateur pas un objectif.

19.5. Équilibre d'acidité (alcalinité, dureté et pouvoir tampon)

Lors de l'empâtage, le mélange des malts et céréales concassées va apporter de l'acidité. Les minéraux de l'eau de brassage vont réagir pour aboutir à un équilibre d'acidité, notamment avec les réactions des carbonates et des ions Calcium et Magnésium.

Cette réaction prend plusieurs dizaines de minutes à s'équilibrer.

19.5.a. Carbonates libres

Tout d'abord dans l'eau tous les carbonates ne sont pas libres, certains sont associés aux ions Calcium et Magnésium (voir [dureté](#)). Seuls les carbonates libres peuvent agir sur l'équilibre de l'acidité, c'est pour cela qu'existent les notions vu précédemment de **dureté temporaire** (ions libres) et d'**alcalinité résiduelle** (alcalinité qui restera dans le moût après que les ions libres aient réagi pour neutraliser une partie de l'acidité des céréales).

19.5.b. Cycle des Carbonates

La famille des carbonates dans l'eau peuvent exister sous 3 formes suivant l'acidité de la solution (voir Figure 43 ci-dessous). C'est 3 formes ne sont pas exclusives mais leurs proportions changent avec l'acidité de la solution.

- CO_2 et H_2CO_3 (dioxyde de carbone ou gaz carbonique dissous et acide carbonique) ; surtout lorsque $\text{pH} : < 8,3$
- HCO_3^- (ion bicarbonate ou hydrogénocarbonate) ; pH de 4,3 à 14,0
- CO_3^{2-} (ion carbonate, plus spécialement ions) ; lorsque $\text{pH} : > 8,3$

Dans le cadre du brassage on a affaire à 3 solutions aqueuses (Figure 44) :

- Dans l'eau de brassage ($\text{pH} \approx 7$), ce sont les HCO_3^- qui prédominent largement ;
- Dans la maïsche ($\text{pH} \approx 5,5$), on trouve une majorité de CO_2 accompagné de HCO_3^-
- Dans la bière ($\text{pH} \approx 4,5$), c'est le CO_2 dissous qui prédomine

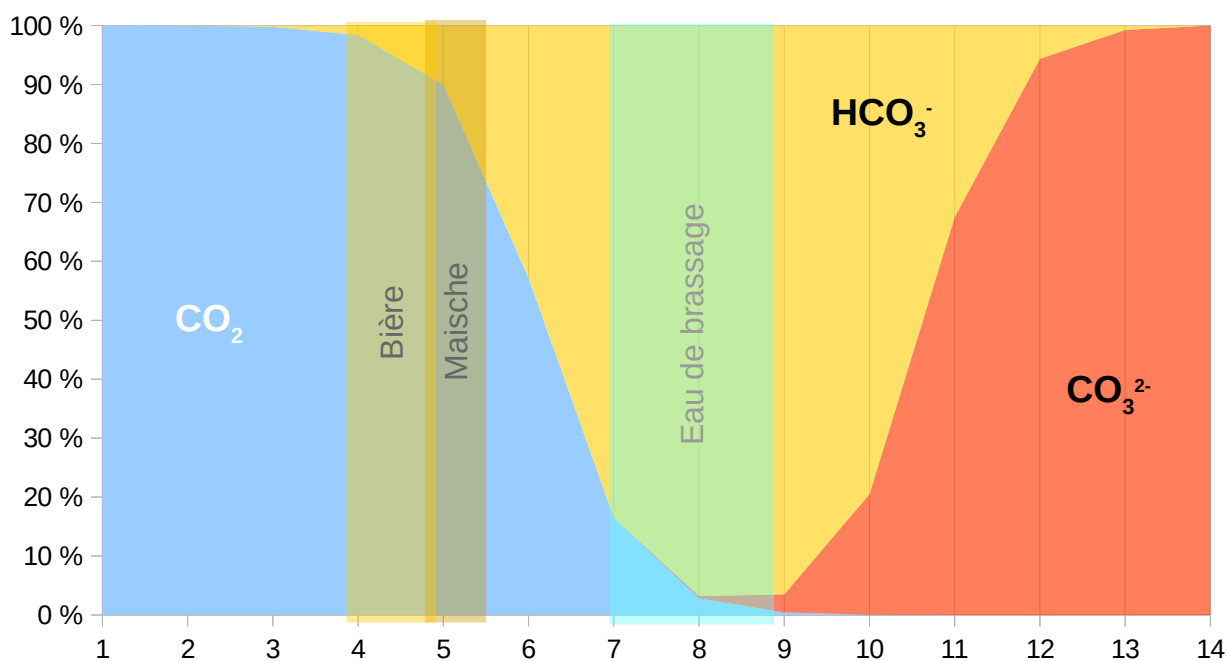


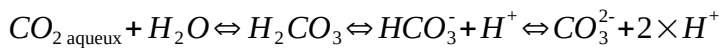
Figure 42: Équilibre des composés carbonates dans une solution aqueuse, suivant l'acidité à température ambiante

Les réactions chimiques possibles sont :

- Une partie du gaz carbonique de l'air se dissout dans l'eau : $CO_{2\text{ gaz}} \rightleftharpoons CO_{2\text{ aqueux}}$ selon la [loi de Henry](#)
- Une partie de ce gaz carbonique dissous réagit avec l'eau pour former de l'acide carbonique (instable). Cet acide instable va alors suivre 1 des 3 voies possibles :
 - Redevenir du CO_2 , d'autant plus que le pH sera faible ;
 - Absorber un proton (H^+) et devenir un ion bicarbonate, d'autant plus que le pH sera moyen ;
 - Libérer 2 protons (H^+) et devenir un ion carbonate, d'autant plus que le pH sera élevé

Ces réactions se produisent suivant le pH de la solution et participent à maintenir son équilibre.

Soit l'équation chimique suivante :



Qui est représenté (simplifié) dans l'illustration suivante :

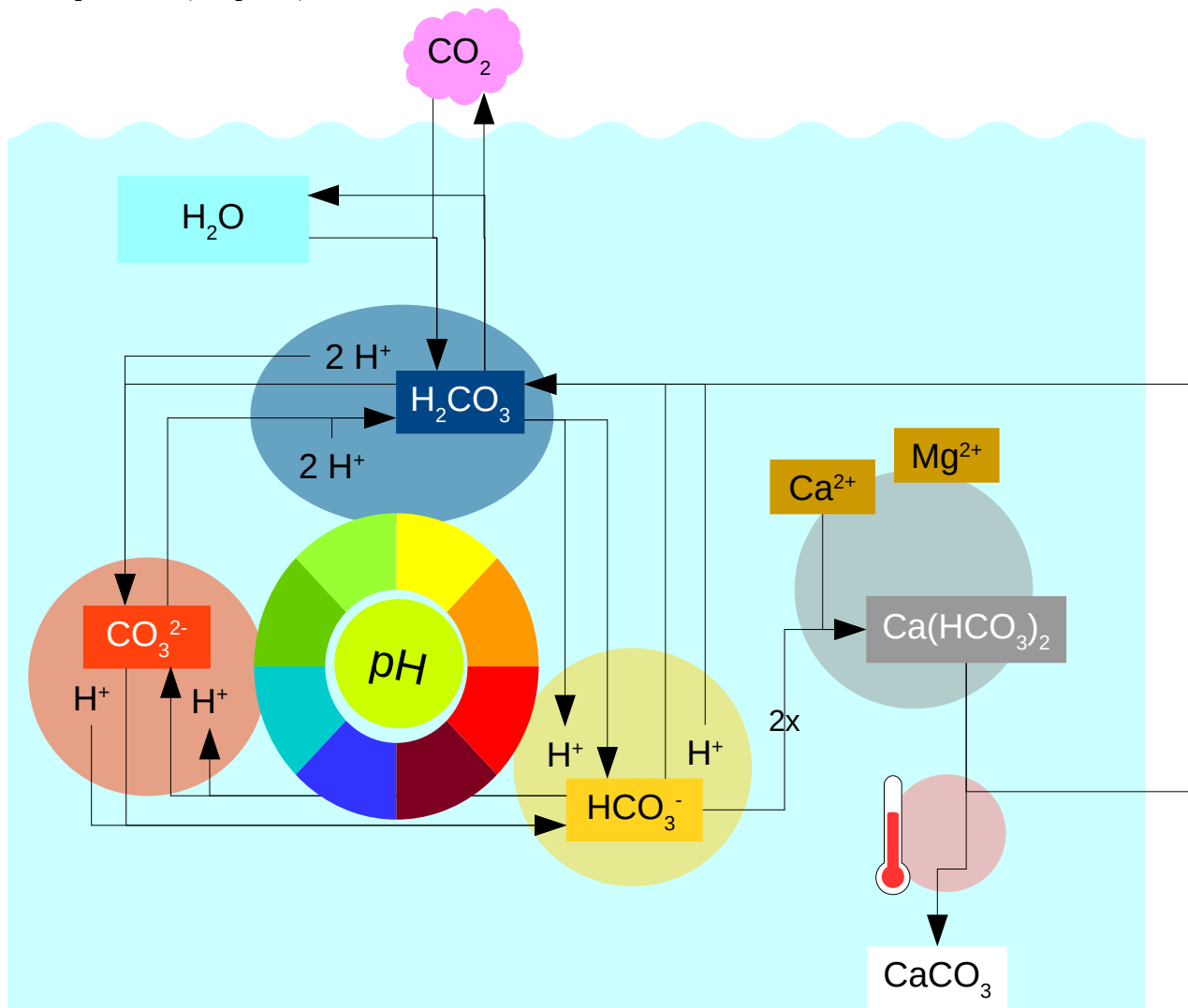


Figure 43: Cycle d'équilibre des composés carbonatés d'une solution aqueuse

Le « choix » entre ces 3 voies s'opère suivant l'acidité de la solution et donc la présence de proton H^+ dans celle-ci. Plus il y aura de H^+ (pH faible) dans la solution plus la voie sera celle produisant le moins de proton et inversement (moins il y aura de proton déjà présent plus la voie sera celle qui produit le plus de protons). Le tout tendant en permanence vers l'équilibre du pH dans la mesure les réserves de carbonates présentent.

Synthèse

C'est pourquoi l'on parle d'effet tampon, le cycle des carbonates dans l'eau permet de maintenir l'acidité d'équilibre d'une solution même si on y ajoute de l'acide ou une base. Ceci dans la mesure des carbonates dissous. La compréhension de ce phénomène permet de comprendre comment la composition de l'eau (les bicarbonates, calciums et magnésiums de l'eau) va contribuer à fournir une acidité optimale pour l'empâtage.

L'ajout des céréales et malts correspond à un ajout acide (abaissement du pH, déficit de H^+).

Les carbonates vont résister à l'acidification dans la mesure de leur présence, c'est-à-dire en favorisant la voie de création de protons (H^+). Ainsi HCO_3^- va avoir tendance à se transformer en CO_3^{2-} avec libération de 2 protons (H^+) et ceux tant qu'il y a du HCO_3^- disponible ou que le déficit de H^+ est comblé.

C'est ce que mesure le RA (Alcalinité résiduelle, voir [plus haut](#)).

Voir le chapitre « [Empâtage / Ajustement eau de brassage](#) » pour voir comment intervenir pour équilibrer sa maische ; car il existe une plage de pH idéal pour l'activité des enzymes lors de l'empâtage.

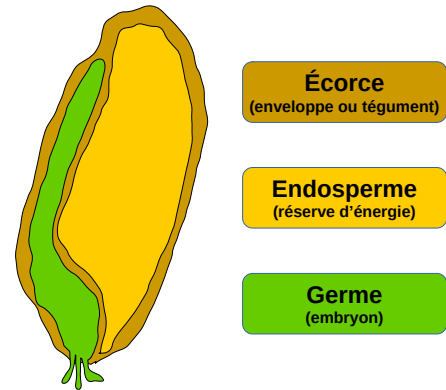
20. Introduction à la biochimie des céréales

La biochimie est une branche de la chimie qui s'intéresse à la chimie du vivant. Dans le cadre de brassage, c'est particulièrement les grains de céréales, composés de glucides, enzymes et protéines qui vont nous intéresser.

20.1. Anatomie d'un grain de céréale

Un grain de céréales est composé principalement de :

- **Écorce** (tégument ou enveloppe) : c'est enveloppe protectrice, essentiellement composé de fibres et qui sera utilisé lors de filtration comme d'un filtre naturel. Peut-être absente ou très fine dans certaines céréales. Dans certaines céréales on trouve le péricarpe (paroi englobant le germe et l'endosperme ; souvent confondu avec l'enveloppe ;
- **Endosperme**, réserve d'énergie sous forme principale d'amidons, mais aussi de protéines et de lipides. C'est aussi dans l'endosperme que les enzymes sont synthétisée lors de la germination (**couche aleurone** englobant l'endosperme). Les enzymes migreront pour libérer puis décomposer l'amidon en glucoses qui lui migrera vers le germe pour lui fournir l'énergie nécessaire à sa croissance ;
- **Germe** (ou embryon), qui est la base de la future plante ; il contient des sources de nutriment concentré (vitamines, sels minéraux, acides gras...). Le germe est partiellement supprimé lors du maltage. Lors de sa croissance la plumule va se développer à partir du germe ou le long de la graine pour ensuite percer et devenir la future tige principale de la plante.



Anatomie d'une graine d'orge

Figure 44: Anatomie d'une graine d'orge

20.1.a. Composés importants des graines de céréales

Glucides

Référence : [wikipédia](https://fr.wikipedia.org)

Chimiquement il s'agit d'une classe de composés organiques contenant un groupe carbonyle (composé comportant une double liaison entre un atome de Carbone et un atome d'Oxygène) et au moins 2 groupes hydroxyles (-OH). Ils appartiennent aux familles des cétones ou des aldéhydes. Dénommé anciennement hydrates de carbone ou hydrocarbonates. Ils sont les composés essentiels du vivant. Les graines de céréales en contiennent une part importante (env. 60 %) sous forme d'amidon qui est la forme privilégiée de stockage d'énergie pour les végétaux ([voir chapitre dédié plus bas](#)).

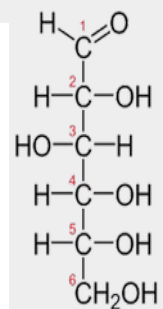


Figure 45:
Le Glucose

Protéines

Référence : [wikipédia](https://fr.wikipedia.org)

Macromolécules biologiques présentes dans les cellules vivantes. Elles sont formées d'une ou plusieurs chaînes de polypeptides. Eux-mêmes composées d'acides aminés liés par des liaisons peptidiques.

Les protéines sont essentielles à la vie et jouent de nombreux rôles structuraux ou métaboliques.

[Voir le chapitre dédié plus bas.](#)

Certaines protéines spécifiques agissent par catalyse sur certaines réactions chimiques, on les nomme **enzymes** (voir chapitre [Biochimie des Enzymes](#)).

Sels minéraux

Référence : [wikipédia](https://fr.wikipedia.org)

Ce sont des éléments chimiques d'origine minérale qui entrent dans la composition des organismes vivants et qui sont présents dans l'alimentation animale et végétale. Ils se présentent sous forme ionique

(anions ou cations) ; ce sont des substances indispensables aux organismes vivants. Les sels sont l'association (composés) de 2 ions généralement. On distingue les éléments principaux (Calcium, Magnésium, Phosphore, Potassium, Sodium et Souffre) et les oligoéléments (Aluminium, Arsenic, Bore, Chlore, Chrome, Cuivre, Fer, Fluor, Iode, Nickel, Zinc...).

Certains de ces sels peuvent être utilisés pour ajuster l'eau de brassage, voir [chapitre sur l'ajustement de l'eau de brassage](#).

On distingue les sels minéraux par famille (les plus important en brassage) :

- Carbonates, à base de l'ion carbonate (CO_3)
- Sulfates, à base de l'ion Sulfate (SO_4)
- Chlorures, à base de l'ion chlore (Cl)
- Potasses, à base de l'ion Potasse (K)

Tableau 23: Désignation des sels minéraux courant en brassage

Nom courant	Nom courant (anglais)	Nomenclature UICPA	Formule chimique
Gypse	Gypsum	Sulfate de Calcium	CaSO_4
Sel de table	Sea salt	Chlorure de Sodium	NaCl
Sel d'Epson	Epsom salt	Sulfate de Magnésium	MgSO_4
E509		Chlorure de Calcium	CaCl_2
Bicarbonate de soude	Baking soda	Hydrogénocarbonate de Sodium	NaHCO_3
Craie (Blanc de Medon)	Limestone	Carbonate de Calcium	CaCO_3

20.1.b. Gluten

Le gluten est une substance collante composée de protéines (prolamines et glutéines) que facilite la panification notamment. Le gluten n'est pas à proprement parlé présent dans les céréales, il se forme lors de la fabrication de la pâte (mélange avec de l'eau).

Toutes les « vraies » céréales (famille *Poacée*) contiennent du gluten, mais ce sont surtout les *Pooidées* qui en contiennent beaucoup et d'un type particulier.

Dans une partie de la population humaine le gluten *Pooidée* (la prolamine surtout) peut déclencher des intolérances, des allergies, voir des réactions auto-immunes indésirables responsables d'un large éventail de troubles .

Tableau 24: Gluten dans les principales céréales

Amidonnier	Épeautre	Blé tendre	Engrain	Orge	Avoine	Seigle	Riz	Maïs	Sorgho
12 à 14 %	10 à 12 %	8 à 14 %	7 à 8 %	6 %	5,6 %	3 %			0 %

20.1.c. Malt

Référence : [wikipédia](#)

Le malt est une céréale germée puis cuite afin de dégager ses arômes. L'amorce de germination va produire des enzymes (voir chapitre [Biochimie des Enzymes](#)) qui sont utiles à la transformation des réserves d'amidon en sucres simples. Le plus souvent le malt de brassage est du malt d'orge, mais il existe aussi du malt de blé ou de seigle.

20.2. Céréales de brassage

Les céréales sont des plantes cultivées principalement pour leurs graines, utilisés en alimentation humaine ou animale, souvent moulus. Le même terme désigne les plantes et les graines de ces plantes.

Historiquement elles sont le fondement de l'alimentation dans la majorité des sociétés sédentaires et un élément majeur de l'histoire humaine.

Agronomiquement, on distingue 2 types de céréales :

- Céréales d'hiver, semé à l'automne elles ont besoin de végéter au froid pour ensuite pousser, généralement plus productives ;
- Céréales de printemps, semé au printemps ;

En agronomie ce sont principalement les plantes de la famille des *Poaceae* (graminées), mais quelques autres plantes appartenant à d'autres familles comme le sarrasin, le quinoa, l'amarante ou le sésame sont considérés comme des céréales.

Dans le cadre du brassage, ce sont surtout les céréales maltées, et particulièrement l'orge maltée qui sont utilisées.

Arbre phylogénétique des céréales de brassage

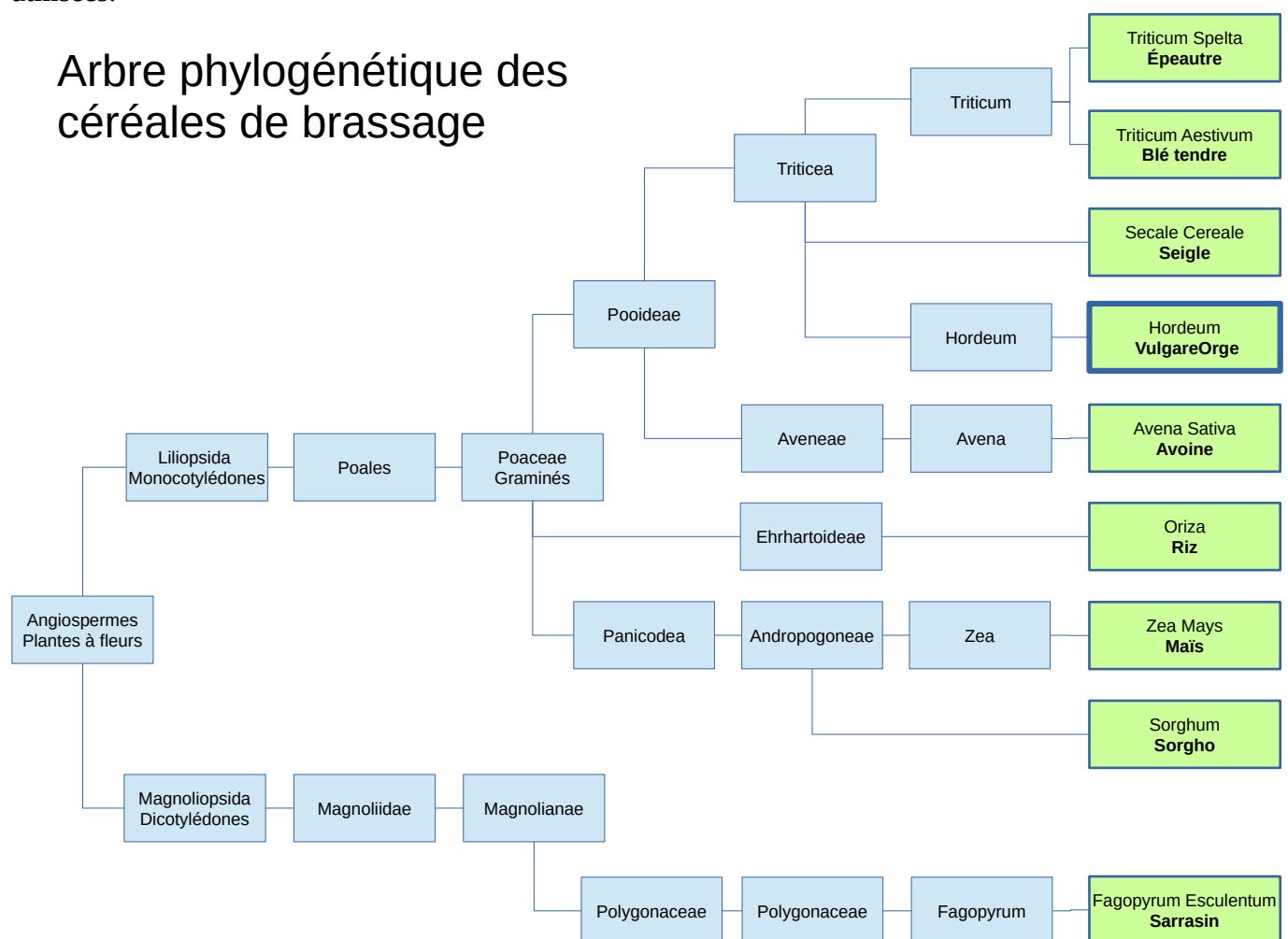


Figure 46: Arbre phylogénétique des céréales de brassage

Ci-après fiche de présentation des principales céréales.

Les dénominations des espèces est indiqué en français, anglais et latin.

Production moyenne annuelle mondiale : Maïs (733 MT), Riz (642 MT), Blé tendre (611 MT), Orge (138 MT), Sorgho (61 MT), Millet (32 MT), Avoine (24 MT) et Seigle (15 MT).

20.2.a. Triticea

Cette tribu (phylogénétique) de céréales comprend les céréales les plus utilisées en brassage moderne. Ce sont aussi les représentantes des plus anciennes de céréales domestiquées par l'homme : les Blés (*Triticum*), les Orges (*Hordeum*) et les Seigles (*Secale*).

Elles contiennent toutes des protéines de stockage qui sont parfois responsables d'intolérances (gluten le plus souvent).

Orge commune

Désignation	Commune	Orge commune
	Latine	<i>Hordeum vulgare</i>
	Anglaise	Barley
Famille	Triticea / Hordeum	
Référence	wikipédia	
Origine	Afrique du Nord, Crête, Tibet	
Domestication	– 8000, proche-orient	
Usage brassicole	Malté	C'est la base des bières modernes, compose de 70 à 100 % des sources d'amidon et d'enzymes.
	Cru	Souvent utilisé dans les stouts comme apports de protéines pour améliorer la tenue de la mousse.
	Enveloppe	Filtration du moût
	Gélatinisation	58 à 65 °C



Figure 47: Orge commune
source : wikipédia.fr

L'orge commune c'est « la » céréale reine du brassage. Utilisé malté mais parfois aussi brute. Très bien adapté au climat méditerranéen de par sa rusticité, elle était la principale céréale utilisée dans l'antiquité grecque, consommée sous forme de galette ou de bouillie. L'orge pousse aussi bien sous les tropiques, qu'à 4500 m d'altitude au Tibet. L'orge est caractérisée par ses épis aux longues barbes et sa rusticité. En agronomie on distingue l'orge à 2 rangs de l'orge à 6 rangs, ainsi que les orges d'hiver et de printemps. Il existe des cultivars spécifiques pour l'usage brassicole.

Blé tendre ou froment

Désignation	Commune	Blé tendre (froment sous forme de graine)
	Latine	Triticum aestivum
	Anglaise	Wheat
Famille	Triticea / Triticum	
Référence	wikipédia	
Origine	Afrique du Nord, Crête, Tibet	
Domestication	– 6500, proche-orient	
Usage brassicole	Malté	Utilisé pour les bières blanches, apport d'acidité
	Cru	Utilisé pour les bières blanches, wheat beer et les wit, apport d'acidité et de protéines. Peu être utilisé sous forme de farine (max 10 à 15 % dans ce cas).
	Enveloppe	Fine, ne permet pas la filtration ; ne pas utiliser à plus de 20 %.
	Gélatinisation	58 à 64 °C



Figure 48: Blé tendre
source : wikipédia.fr

Le blé tendre ou froment, est l'espèce de blé la plus cultivée au monde. C'est le blé à farine panifiable qui produit un pain blanc. Cette céréale est issue d'hybridation naturelle, elle a des ancêtres commun avec l'amidonniér et les épeautres. L'expression blé tendre est usité en opposition avec le blé dur (triticum turgidum) utilisé pour la préparation des semoules et pâtes.

Épeautre ou grand-épeautre

Désignation	Commune	Épeautre ou Grand-épeautre
	Latine	Triticum Spelta
	Anglaise	Speltwheat
Famille	Triticea / Triticum	
Référence	wikipedia	
Origine	Croisement entre l'engrain et l'égilope (graminée sauvage)	
Domestication	– 8000, proche-orient	
Usage brassicole	Malté	Apporte des arômes doux de noisettes et des notes acidulées. 50 % max
	Cru	Traditionnellement utilisé pour Dinkelbier (bière d'épeautre de Bavière). Apporte un goût très rustique, une mousse ferme et épaisse. Très riche en protéines.
	Enveloppe	Filtration du moût mais rapidement astringent
	Gélatinisation	xxxx



Figure 49: Épeautre
source : wikipédia.fr

C'est une céréale proche du blé tendre mais vêtue, le grain reste couvert de sa balle lors de la récolte. Panifiable il contient des protéines complètes ; d'un point de vue diététique le grand épeautre peut être vu comme plus riche que le blé tendre. Fut très utilisé en brassage ou pour le pain par les Gaulois, d'où son autre nom de « blé Gaulois ». C'est probablement avec l'épeautre que les premières proto-bières ont été brassées.

Engrain ou petit-épeautre

Désignation	Commune	Engrain ou petit-épeautre
	Latine	Triticum monococcum
	Anglaise	Einkorn wheat
Famille	Triticea / Triticum	
Référence	wikipedia	
Origine	Engrain sauvage (triticum boeoticum), Asie mineure	
Domestication	– 8600, proche-orient	
Usage brassicole	Malté	Quasi impossible à malter de par la fragilité du grain.
	Cru	Très peu utilisé, produit des moûts très fermentescible, des arômes moyens de vanille et une bonne stabilité de la mousse.
	Enveloppe	Filtration du moût
	Gélatinisation	xxx



Figure 50: Engrain
source : wikipédia.fr

C'est la première céréale domestiquée par l'homme (–8000 au proche-orient), avant l'orge et l'amidonniér. Sa domestication a consisté à sélectionner les engrains sauvages dont les grains ne se détachait pas, ce qui permettait de couper les épis plutôt que de ramasser les grains uns à uns tombés au sol. Il s'agit là du premier acte de domestication dont les archéologues ont une trace.

Faible teneur en gluten mais panifiable ; il comprend encore des protéines complètes assurant un apport riche en acides aminés essentiels.

Amidonniér ou moyen-épeautre

Désignation	Commune	Amidonniér, moyen-épeautre ou épeautre de Tartarie
	Latine	Triticum dicoccum
	Anglaise	Emmer wheat (hulled wheat)
Famille	Triticea / Triticum	
Référence	wikipédia	
Origine	Israël / Iran	
Domestication	– 7500, proche-orient	
Usage brassicole	Malté	
	Cru	Arômes doux de noisettes.
	Enveloppe	Très dur et épaisse, astringente
	Gélatinisation	xxx



Figure 51: Amidonniér
source : wikipédia.fr

L'amidonniér est une sous-espèce de céréale à faible rendement appartenant au genre des blés. C'est avec l'engrain la plus ancienne céréale domestiquée par l'homme. Elle était très largement cultivée dans l'Antiquité. Elle n'est plus, aujourd'hui, qu'une céréale résiduelle que l'on ne trouve que dans les régions montagneuses d'Europe et d'Asie. Son origine provient de l'amidonniér sauvage. Celui-ci est également à l'origine du blé dur.

Seigle

Désignation	Commune	Seigle
	Latine	Secale cereale
	Anglaise	Rye
Famille	Triticea / Secale	
Référence	wikipedia	
Origine	Probablement Turquie	
Domestication	– 2000, Tchéquie	
Usage brassicole	Malté	Améliore la complexité des arômes, apporte des goûts légèrement épicés et très rond. Contiens beaucoup de protéines et de glucanes qui ont tendance à rendre le moût collant. Absorbe l'eau rapidement, nécessite moins d'eau que pour l'orge. Généralement de 10 à 20 %.
	Cru	
	Enveloppe	Aucune, rend la filtration délicate
	Gélatinisation	De 57 à 70 °C



Figure 52: Seigle
source : wikipedia.fr

Le seigle est une plante annuelle du genre *Secale* cultivée comme céréale ou comme fourrage. C'est une céréale rustique adaptée aux terres pauvres et froides. Sa culture est de nos jours marginale.

Le genre *Secale* comprend de nombreuses espèces originaires d'Asie centrale. Son origine reste assez largement indéterminée. Il a été utilisé par les Celtes et les Germains, surtout en Europe occidentale et centrale. Il est devenu assez répandu au Moyen Âge en France et Allemagne.

Le méteil est un mélange de culture de Seigle et de Blé tendre.

20.2.b. Avoine

Désignation	Commune	Avoine ou Avoine commune
	Latine	Avena sativa
	Anglaise	Oat
Famille	Avenae / Avena	
Référence	wikipedia	
Origine	incertaine	
Domestication	– 2500, Europe centrale et septentrionale	
Usage brassicole	Cru	Doit être préalablement cuite
	Flocon	Source importante de protéines, améliore notablement la qualité de la mousse. Très intéressante dans les Porter et Stout, apporte une douceur et une mousse crémeuse. Contiens aussi beaucoup de glucanes qui rendent rapidement le moût très collant. Utilisation conseillée max 10 %.
	Enveloppe	Utilisé séparément pour améliorer le filtrage
	Gélatinisation	De 57 à 72 °C



Figure 53: Avoine
source : wikipedia.fr

L'Avoine cultivée, parfois appelée « avoine commune », est une espèce de plantes de la famille des *Poaceae* (graminées). Ce sont des plantes herbacées annuelles aux tiges (chaumes) dressées et aux inflorescences en panicules lâches, aux épillets retombants. L'avoine est cultivée comme céréale ou comme plante fourragère à couper en vert ; ses pousses tendres et sucrées plaisent aux animaux de la ferme.

20.2.c. Riz

Désignation	Commune	Riz
	Latine	<i>Oryza sativa</i> , <i>oryza glaberrima</i>
	Anglaise	Rice
Famille		Oryza
Référence		wikipedia
Origine		Chine (Nord)
Domestication		– 8000, Chine
Usage brassicole	Cru	Très utilisé pour les bières légères américaines et japonaises. Apporte très peu de corps et très peu de couleur. Permet de produire facilement une bière très sèche.
	Flocon	
	Enveloppe	Utilisé séparément pour améliorer le filtrage
	Gélatinisation	De 70 à 85 °C



Figure 54: Riz
source : wikipedia.fr

Le riz est une céréale de la famille des graminées, cultivée dans les régions tropicales, subtropicales et tempérées chaudes pour son fruit, riche en amidon. Il désigne l'ensemble des plantes du genre *Oryza*, parmi lesquelles les deux seules espèces cultivées (le plus souvent dans des champs plus ou moins inondés appelés rizières) : *Oryza sativa* (appelé couramment « riz asiatique ») et *Oryza glaberrima* (appelé couramment « riz ouest-africain » ou « riz de Casamance »).

C'est la première céréale mondiale pour l'alimentation humaine (à lui seul il représente 20 % des besoins mondiaux en énergie alimentaire), la deuxième après le maïs pour le tonnage récolté. Le riz est notamment l'aliment de base de la cuisine asiatique, chinoise, indienne et japonaise.

Ne contient pas de gluten.

20.2.d. Maïs

Désignation	Commune	Maïs
	Latine	<i>Zea mays</i>
	Anglaise	Corn, maze, maize
Famille		Tripsacinea / Zea
Référence		wikipedia
Origine		Téosinte, Amérique centrale
Domestication		– 7000, Mexique (Tehuacàn)
Usage brassicole	Cru	
	Flocon	Historiquement utilisé dans les British Bitter, pale Ale américaine et les bières traditionnelles d'Amérique du Sud. Apporte du corps sans apporter trop de saveurs ni couleur.
	Gélatinisation	De 72 à 78 °C



Figure 55: Maïs
source : wikipedia.fr

Le maïs est une plante herbacée tropicale annuelle de la famille des graminées, largement cultivée comme céréale pour ses grains riches en amidon, mais aussi comme plante fourragère.

Cette espèce, originaire du Mexique, constituait l'aliment de base des Amérindiens avant l'arrivée en Amérique de Christophe Colomb. La plante fut divinisée dans les anciennes civilisations d'Amérique centrale et méridionale, et était cultivée par les Nord-Amérindiens avec la courge et le haricot en utilisant la technique dite « des trois sœurs ». Introduite en Europe au XVI^e siècle, elle est aujourd'hui la première céréale cultivée dans le monde devant le riz et le blé.

20.2.e. Sorgho commun, Sorgho ou gros-mils

Désignation	Commune	Sorgho, Sorgho ou Gris-mils
	Latine	Sorghum bicolor
	Anglaise	Sorghum, great millet
Famille	Sorghum	
Référence	wikipédia	
Origine	Sorgho sauvage, Afrique	
Domestication	– 2500, Sud du Sahara (utilisé sauvage dès –100 000).	
Usage brassicole	Malté	Se comporte de manière similaire à l'orge. De plus en plus utilisé pour l'absence de gluten.
	Cru	Utilisé traditionnellement en Afrique pour produire des boissons fermentées ou non.
	Enveloppe	
	Gélatinisation	De 69 à 75 °C



Figure 56: Sorgho
source : wikipédia.fr

Le sorgho est une espèce de plantes monocotylédones de la famille des graminées, originaire d'Afrique. C'est une plante herbacée annuelle, qui peut atteindre 3 mètres de haut. Elle est cultivée soit pour ses graines, le sorgho grain, soit comme fourrage, le sorgho fourrager.

C'est la principale céréale pour de nombreuses populations à faible revenu vivant dans les régions tropicales semi-arides d'Afrique et d'Asie.

Ne contient pas de gluten.

20.2.f. Millet commun ou petit-mils

Désignation	Commune	Millet ou petit-mils
	Latine	Panicum Milliaceum
	Anglaise	Proso millet, broomcorn millet or white millet
Famille	Panicum	
Référence	wikipédia	
Origine	Asie tempérée (probablement Inde)	
Domestication	-8000, Chine (Cishan)	
Usage brassicole	Malté	Utilisé traditionnellement pour fabriquer des boissons fermentées en Afrique (Bantu).
	Cru	
	Enveloppe	
	Gélatinisation	xxx



Figure 57: Millet
source : wikipédia.fr

Plante herbacée annuelle, cultivée pour ses graines comestibles, est une céréale secondaire, bien adaptée aux zones semi-arides. Parfois considérée comme mauvaise herbe dans certaines cultures céréalières d'Amérique du Nord. C'est le vrai millet des Romains, cultivé en Europe dès les temps préhistoriques et probablement avant la culture du froment. À ne pas confondre avec le millet des oiseaux.

Ne contient pas de gluten.

20.2.g. Sarrasin ou blé noir

Désignation	Commune	Sarrasin ou blé noir
	Latine	Fagopyrum esculentum
	Anglaise	Buckwheat
Famille	Polygonaceae / Fagopyrum	
Référence	wikipedia	
Origine	Sud de la Chine	
Domestication	Chine (Sanjiang)	
Usage brassicole	Malté	Se comporte comme l'orge, apporte un léger arôme de noisette. Toutefois plus riche en protéines il est conseillé de pas dépasser 50 % du total de céréales.
	Cru	
	Enveloppe	
	Gélatinisation	xxx



Figure 58: Sarrasin
source : [wikipedia.fr](#)

Le sarrasin est une espèce de plantes à fleurs, annuelles, de la famille des Polygonacées cultivée pour ses graines destinées à l'alimentation humaine comme animale. Malgré son appellation courante de blé noir, le sarrasin n'est pas une espèce du genre *Triticum* (genre regroupant les variétés de blé), ni même une espèce de graminées. Il est dépourvu de gluten, ce qui le rend difficile à utiliser en panification ou pour la confection des pâtes. Dans l'alimentation, le sarrasin est considéré comme une céréale, parfois il est qualifié de pseudo-céréale.

La plante est originaire du Sud de la Chine. L'espèce sauvage y est encore présente. Plus tard, il s'est répandu par la culture en Extrême-Orient, principalement Corée et Japon, ainsi qu'en Europe au XIV^e siècle.

Ne contient pas de gluten.

20.3. Glucides

Référence : [Wikipédia](#)

Les glucides sont le cœur de la bière et de sa fabrication.

La fabrication de la bière consiste principalement à réduire des chaînes glucides en éléments simples qui seront ensuite transformés en alcool.

Ces chaînes glucidiques sont l'amidon contenu dans les grains de céréales (endosperme).

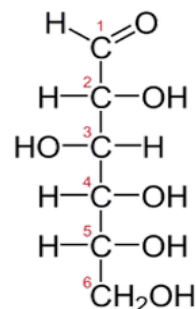


Figure 59: Monomère de Glucose

20.3.a. Introduction à la chimie des (bio-) polymères

Pour comprendre la grande famille des glucides, il faut préalablement se familiariser avec quelques notions de chimie des (bio)polymères.

La notion de bio-polymères ne concerne pas que les glucides, les protéines ou les polyphénols sont aussi des polymères (d'acides aminés).

Monomères

Référence : [wikipedia](#)

Substance chimique de base pour la construction d'oligomère et de polymères. Ici le monomère principal qui va nous intéresser sera le Glucose.

Polymères

Référence : [wikipedia](#)

Un polymère est un ensemble constitué de la répétition d'un motif de macro-molécules (monomère). Les monomères sont liés par une liaison de covalence.

Ce motif peut être constitué d'un seul monomère (**homopolymères**), ou de plusieurs (**copolymères**). Ces derniers peuvent être classés en plusieurs types : alterné (la répétition des monomères est alterné), à bloc (les monomères sont organisés par blocs d'un même monomère), statistique (les différents monomères sont mélangés de façon aléatoire).

Oligomères

Référence : [wikipedia](#)

Il s'agit le plus souvent d'un petit polymère dont le degré de polymérisation ([wikipedia](#)) est de l'ordre de 2 à 10 et dont le degré est fixe, comme les disaccharides (2 hexoses) par exemple.

20.3.b. Description des Glucides

Les glucides sont généralement considérés comme une classe de composés organiques contenant un groupe carbonyle (C) et au moins deux groupes hydroxyles (-OH).

Les glucides font partie, avec les protéines et les lipides, des constituants essentiels des êtres vivants et de leur nutrition, car ils sont un des principaux intermédiaires biologiques de stockage et de consommation d'énergie. Chez les organismes autotrophes, comme les plantes, les sucres sont convertis en amidon pour le stockage. Chez les organismes hétérotrophes, comme les animaux, ils sont stockés sous forme de glycogène puis utilisés comme source d'énergie dans les réactions métaboliques.

Les glucides sont répartis en 2 familles : les oses et osides.

- Les **Oses** (monosaccharides, [wikipedia](#)) sont des monomères de glucides, ils sont composés d'au moins 3 carbones. Ils ne sont pas hydrolysables, et ont généralement un pouvoir sucrant (voir [saveur sucrée](#)). Ils peuvent être libres ou liés entre eux ou à des protéines ou lipides. On les distingue par leur nombre d'atomes de carbone : 3, 4, 5, 6, etc. Toutefois le type qui nous intéresse le plus sera les **Hexoses** ([wikipedia](#)), 6 carbones (soit $C_6H_{12}O_6$), On y trouve notamment : glucose, fructose, galactose

- Les **Osides** (polysaccharides, [wikipédia](#)) sont des polymères d'oses, c'est-à-dire des chaînes plus ou moins longues et complexes d'oses. Certains polymères sont des chaînes composés du même monomères (homopolymères), d'autres composés de plusieurs monomères différents, d'autres peuvent être ramifiés, c'est le cas de l'amidon. Ils sont généralement hydrolysables, ce qui signifie qu'ils peuvent être réduits en osides plus petits et parfois jusqu'à des oses simples.

20.3.c. Caractéristiques des glucides

Au niveau gustatif

Les glucides ont souvent un pouvoir sucrant, ce dernier représente la valeur sucrante par unité de masse d'un composé par rapport à une référence (saccharose ou sucre de table). Sa valeur est estimée par un groupe de dégustateurs ; car s'agissant d'une sensation, aucune mesure n'est possible.

Lorsqu'un aliment a une saveur sucrée on parle d'édulcorant, ce n'est pas toujours un glucide.

Les chaînes glucidiques longues n'ont souvent aucun pouvoir sucrant, elles sont trop longues que pour nos capteurs gustatifs les repèrent (voir chapitre [goût sucré](#)).

Au niveau nutritionnel (pour l'homme)

Certains glucides sont digestibles, d'autres non (les fibres ou la cellulose sont non digestibles, mais sont plus ou moins fermentés dans l'intestin).

- Au niveau de la bouche, la mastication permet l'action des enzymes salivaires (amylases) qui réduisent les osides (l'amidon devient dextrine et maltose par hydrolyse) ; ce sont les mêmes enzymes que l'on retrouve dans le malt.
- Au niveau de l'intestin grêle, d'autres enzymes (amylase pancréatique et disaccharisades) continuent l'hydrolyse et décomposent les dextrines et maltose en glucose, fructose, galactose, maltose et isomaltose.
- Au niveau de la brosse de l'intestin, seuls les monosaccharides (glucose, fructose et galactose) passent la barrière et pénètrent dans le sang (sont donc assimilés), le reste sera évacué avec les autres déchets alimentaires.

L'indice glycémique permet d'établir un classement des aliments contenant des glucides, basé sur l'effet sur la glycémie (taux de glucides dans le sang). L'indice glycémique est une mesure sans unité, la référence (100) étant le glucose pur. Cet indice reflète uniquement la partie assimilable des aliments (les glucides pouvant être réduit lors de la digestion en sucres simples).

On peut ainsi avoir des glucides au goût sucré et avec un indice glycémique élevé, mais aussi des glucides sans saveur sucrée mais avec le même indice glycémique. L'indice glycémique et le pouvoir sucrant ont donc peu de rapport.

20.3.d. Glucides impliqués dans le brassage

Sucres simples

Référence : [wikipédia](#)

Ce sont des glucides simples, non hydrolysables, composés de 1 à 2 monomères d'hexose, essentiellement :

- Monosaccharides : glucose, fructose, galactose, mannose...
- Diholosides (2 monosaccharides) : saccharose, maltose, lactose...

Le **Glucose** ([wikipédia](#)) est synthétisé par de nombreux organismes végétaux en présence d'eau (H₂O), de gaz carbonique (CO₂) et d'énergie lumineuse par le biais de la photosynthèse. À l'inverse sa dégradation sous forme d'eau et de gaz carbonique est une source d'énergie pour de nombreuses cellules vivantes. Cela en fait l'élément

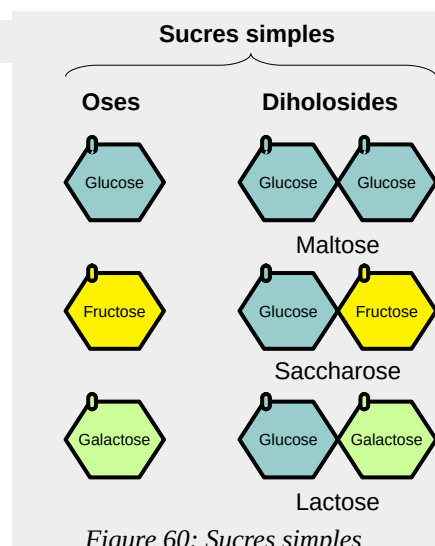


Figure 60: Sucres simples

principal de stockage de l'énergie du vivant. Le glucose est stocké chez les végétaux sous forme d'amidon et chez les animaux sous forme de glycogène.

Le **Fructose** ([wikipédia](#)) est un isomère du Glucose, on le trouve notamment dans les fruits et le miel.

Lié à un Glucose il forme le saccharose ou sucre de table.

Son assimilation par la digestion humaine est assez similaire à celle du glucose, il a toutefois un pouvoir sucrant un peu supérieur. Il est très peu présent dans les céréales.

Le **Galactose** ([wikipédia](#)) existe surtout sous forme de Lactose (osides associant 1 glucose et 1 galactose) dans le lait ; on le trouve aussi toutefois sous forme libre dans certains fruits. Il n'est pas présent dans les céréales.

Le **Saccharose** ([wikipédia](#)), c'est le **sucre de table** ; il est composé d'un glucose lié à un fructose par une liaison osidique. Le saccharose se dissout très facilement dans une solution aqueuse, d'autant plus que l'eau est chaude. On peut dissoudre à saturation jusqu'à 2 g de saccharose pour 1 g d'eau à température ambiante. Peu présent dans des céréales, il peut être apporté par des jus de fruits ou du sucre de table dans certaines recettes.

Le **sucre inverti** est un cas particulier, car il ne s'agit pas d'un polymère mais d'un mélange homogène de glucose et de fructose non lié chimiquement.

Le **Maltose** ([wikipédia](#)), c'est un sucre composé de 2 glucoses que l'on trouve principalement dans le malt, il est issu de l'amidon.

Le **Lactose** ([wikipédia](#)), c'est sucre présent dans le lait des mammifères. Il est composé de la liaison d'un glucose avec un galactose. Le lactose n'est généralement pas présent dans la bière et n'est pas digérable par les levures.

Sucres complexes

Référence : [wikipédia](#)

Ce sont des polymères de monosaccharides (polyosides) hydrolysables, composés d'une chaîne d'hexoses.

Dans la maïs on trouve notamment :

- maltotriose : 3 glucoses ;
- maltotetralose : 4 glucoses ;
- maltopentalose : 5 glucoses ;
- dextrine linéaire : de 6 à 10 glucoses ;
- dextrine limite : petite branche de glucoses lié par une liaison peptidique (proche de l'amylopectine mais très courte) ;
- amyloses : longues chaînes de glucoses (500 à 2000 glucoses) ;
- amylopectines : branches type dextrines limites mais beaucoup plus longues ;
- amidon (voir ci-dessous).

Polyholosides

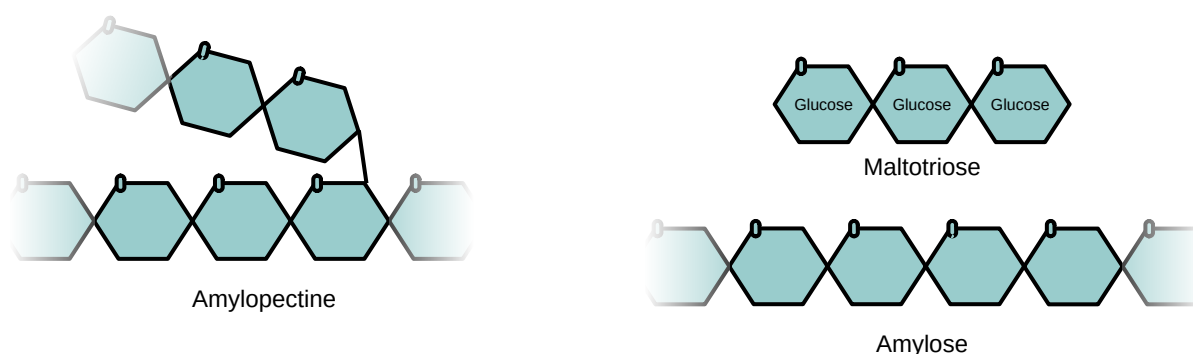


Figure 61: 3 osides courants

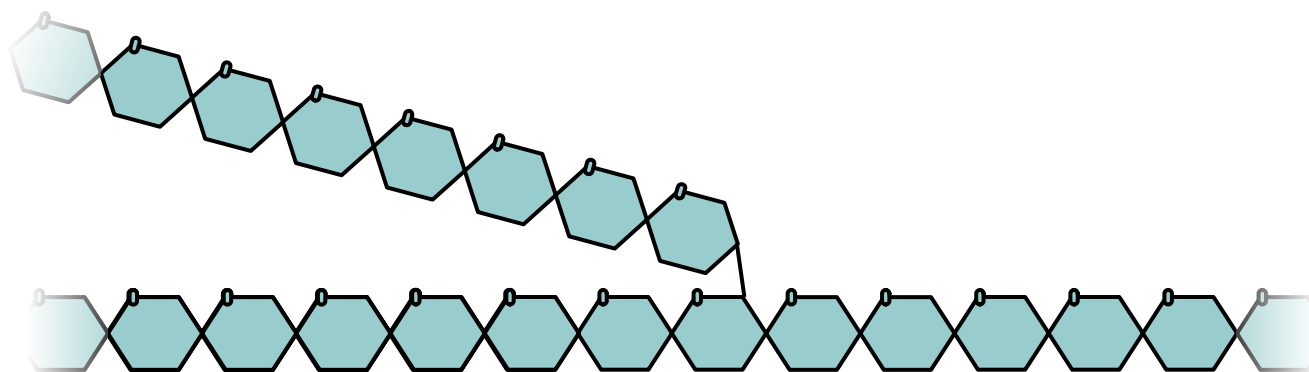
Amidon

Référence : [wikipédia](#)

L'amidon est un glucide complexe, un polymère de glucose (chaînes de molécules de D-Glucose). C'est une molécule de réserve d'énergie pour les végétaux supérieurs. L'amidon se trouve notamment dans les graines, les racines, les tubercules et rhizomes.

Sa structure en branches est composé d'une répétition de 2 homopolymères (Amylose et Amylopectine). L'amylopectine (insoluble) forme des branches auxquelles sont liés les Amyloses (soluble) ; le tout forme un polymère complexe branchée. L'amidon peut contenir de 10 000 à 100 000 unités de glucose.

Les molécules d'amidon dans les graines se présentent sous une forme semi-cristalline et empaqueté dans des granules d'amidons.



Amidon (extrait) : amyloses + amylopectines

Figure 62: Amidon (extrait) : amyloses + amylopectines

Cellulose

Référence : [wikipédia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Cellulose)

La **Cellulose**, c'est un polymère linéaire de glucose (homopolymère) qui est le constituant principal des parois des végétaux. Constitue 35 à 40 % de la biomasse des végétaux. Les macromolécules de cellulose associés forme des microfibrilles, qui elles-mêmes associés forment les parois des cellules végétales. Il s'établit les liaisons hydrogène entre les molécules de glucose.

Proche de l'amidon (polymère de glucose) sa structure linéaire et les liaisons entre glucose en font une matière totalement différente.

Elle n'est pas digérée par l'humain, mais est cependant utile au bon fonctionnement des intestins sous forme de fibres végétales. Dans la maïs la cellulose est présente (environ 5 %) dans les enveloppes des grains broyés et sa nature fibreuse servira au filtrage. La cellulose n'est pas non plus dégradée par les levures lors de la fermentation.

20.3.e. Classification des glucides (brassage)

Dans le cadre du brassage on retrouve aussi une distinction des glucides en ceux dits fermentescibles (assimilable par les levures) et non fermentescibles (non assimilables par les levures). Les différentes catégories (chimique, pouvoir sucrant, indice glycémique, fermentescibles) se recouvrent partiellement.

On peut résumer ainsi :

Tableau 25: Caractéristiques principales des glucides

		Pouvoir sucrant (goût)	Digestibilité par l'homme	Digestibilité par les levures	Enzymes réductrices (hydrolysable)
Sucres simples	Glucose	++	++	++	non
	Fructose	+++	++	++	non
	Maltose	+	++	++	Amylases
Sucres complexes	Saccharose	+++	++	++	Amylases
	Maltotriose	0	+	+	Amylases

Dextrines	0		non	Dextrinases
Amylopectines	0		non	Dextrinases
Amyloses	0		non	Amylases

21. Introduction à la biochimie des protéines

Référence : [Wikipédia](#)

Les protéines ont un rôle fondamental dans la bière malgré une présence assez faible (0,5 %) : saccharification, mousse, arômes, couleur, brillance, goût, pétillance, corps et alcool. Dans le cadre du brassage, les protéines proviennent principalement du malt.

Les protéines sont constituées d'une ou plusieurs chaînes polypeptidiques repliées pour former une structure tridimensionnelle. Chacune de ces chaînes est constituée de l'enchaînement de résidus d'acides aminés liés entre eux par les liaisons peptidiques. Les chaînes protéiques sont bio-synthétisées dans les cellules vivantes par les ribosomes à partir de l'information codée dans les gènes.

La plupart des protéines adoptent une conformation tridimensionnelle unique. La forme naturelle d'une protéine in vivo est son état natif, qui correspond à la forme qu'elle prend pour être biologiquement active et fonctionnelle.

21.1. Fonctions dans le vivant

Les protéines remplissent ainsi des fonctions très diverses au sein de la cellule et de l'organisme :

- les protéines structurelles, qui permettent à la cellule de maintenir son organisation dans l'espace, et qui sont les constituants du cytosquelette ;
- les protéines de transport, qui assurent le transfert des différentes molécules dans et en dehors des cellules ;
- les protéines régulatrices, qui modulent l'activité d'autres protéines ou qui contrôlent l'expression des gènes ;
- les protéines de signalisation, qui captent les signaux extérieurs, et assurent leur transmission dans la cellule ou l'organisme ; il en existe plusieurs sortes, par exemple les protéines hormonales, qui contribuent à coordonner les activités d'un organisme en agissant comme des signaux entre les cellules ;
- les protéines réceptrices, qui détectent les molécules messagères et les autres signaux pour que la cellule agisse en conséquence ;
- les protéines sensorielles détectent les signaux environnementaux (ex. : lumière) et répondent en émettant des signaux dans la cellule ;
- les récepteurs d'hormone détectent les hormones et envoient des signaux à la cellule pour qu'elle agisse en conséquence (ex. : l'insuline est une hormone qui, lorsqu'elle est captée, signale à la cellule d'absorber et d'utiliser le glucose) ;
- les protéines motrices, permettant aux cellules ou organismes ou à certains éléments (cils) de se mouvoir ou se déformer (ex. : l'actine et la myosine permettent au muscle de se contracter) ;
- les protéines de défense, qui protègent la cellule contre les agents infectieux (ex. : les anticorps) ;
- les protéines de stockage, qui permettent la mise en réserve d'acides aminés pour pouvoir biosynthétiser d'autres protéines ;
- les enzymes, qui modifient la vitesse de presque toutes les réactions chimiques dans la cellule sans être transformées dans la réaction (voir chapitre suivant).

21.2. Niveaux d'organisation

En biochimie, on distingue quatre niveaux d'organisation pour décrire la structure des protéines :

- La structure primaire correspond à la séquence en acides aminés.
- La structure secondaire décrit l'arrangement des résidus d'acides aminés observable à l'échelle atomique. Stabilisés par des liaisons hydrogène. Il en existe plusieurs variétés, et il est courant qu'une protéine possède globalement plusieurs types de structures secondaires.
- La structure tertiaire correspond à la forme générale de la protéine observable à l'échelle de la molécule tout entière. Elle décrit les interactions entre les différents éléments de la structure secondaire. Elle est stabilisée par tout un ensemble d'interactions conduisant le plus souvent à la formation d'un cœur hydrophobe, avec éventuellement des liaisons salines, des liaisons

hydrogènes, des ponts disulfure. On désigne souvent par structure tertiaire le repliement d'une protéine.

- La structure quaternaire décrit le complexe résultant de l'assemblage de plusieurs molécules de protéines (plusieurs chaînes polypeptidiques), appelées dans ce cas sous-unités protéiques, pour former un complexe protéique unique. Toutes les protéines ne sont pas nécessairement constituées de plusieurs sous-unités et ne possèdent par conséquent pas toujours de structure quaternaire.

Les protéines ne sont pas des molécules entièrement rigides. Elles sont susceptibles d'adopter plusieurs conformations apparentées en réalisant leurs fonctions biologiques. Dans le cas d'une enzyme par exemple, de tels changements conformationnels peuvent être induits par l'interaction avec le substrat au niveau du site actif. En solution, les protéines subissent également de nombreux changements conformationnels en raison de la vibration thermique de la collision avec d'autres molécules.

21.3. Acides aminés

Voir chapitre Groupes fonctionnels dans le chapitre d'introduction à la chimie.

FAN

21.4. Protéines lors du brassage

Lors du maltage et éventuellement lors de l'empâtage, les protéines du grain d'orge sont découpés par des enzymes (qui sont eux même des protéines) en plusieurs sous-catégories :

- protéines insolubles, qui resteront pour beaucoup dans les drêches
- protéines solubles, qui participent à la tenue de la mousse et éventuellement au trouble de la bière
- acides aminés, qui serviront de nourriture aux levures lors de la fermentation

Un fort taux de protéines peut engendrer des problèmes : couleur plus prononcée, faux goût, excès d'azote soluble (mauvaise stabilité du goût), troubles...

Peut se corriger par un allongement du brassage.

Un faible taux, peu engendrer : mouture fine (filtrage peu efficace, colmatage), manque de FAN (fermentation molle), faible protéines solubles (tenue de mousse mauvaise)

Un taux idéal dans le malt est de l'ordre de 9 à 12 %.

22. Introduction à la biochimie des enzymes

Références : [wikipédia](#) et [BrauKaiser](#)

Les enzymes sont des **protéines** capables d'accélérer des processus chimiques, sans subir de modifications elles-mêmes (phénomène de catalyse). Les enzymes sont généralement très spécifiques à une réaction chimique. Elles agissent en abaissant l'énergie d'activation nécessaire à une réaction chimique, ce qui accroît les vitesses de la réaction. Presque tous les processus métaboliques nécessitent des enzymes pour se dérouler à des vitesses compatibles avec le maintien de la vie. On désigne par **substrat** la matière sur laquelle l'enzyme agit et **produit de réaction** le ou les résultats.

Comme toutes les protéines, les enzymes sont constituées d'une ou plusieurs chaînes polypeptidiques repliées pour former une structure tridimensionnelle. La séquence en acides aminés de l'enzyme détermine la structure de cette dernière, structure qui, à son tour, détermine les propriétés catalytiques de l'enzyme.

Les enzymes sont des molécules bien plus grandes que leurs substrats. Leur taille varie de quelques dizaines à plusieurs milliers d'acides aminés.

Les enzymes pour bien fonctionner ont besoin de conditions environnementales optimales (températures, pH, solution...). Une température trop élevée va dénaturer ou détruire l'enzyme. Des températures trop basses vont en réduire l'activité, mais les processus se produiront quand même, ils prendront plus longtemps. La concentration en enzymes et en substrat a une influence directe sur la réactivité des processus.

22.1.a. Synthèse des enzymes

Les enzymes, comme les autres protéines, sont synthétisés par les cellules vivantes. Ce sont les ribosomes des cellules qui assemblent les acides aminés en polypeptides à partir de l'information contenue dans le code génétique de la cellule (ADN).

Certaines enzymes catalysent des réactions à l'intérieur de la cellule, d'autres peuvent agir de manière extra-cellulaire, c'est le cas des enzymes digestives en général.

22.1.b. Fonctions biologiques

Les enzymes remplissent un grand nombre de fonctions au sein des êtres vivants. Elles sont indispensables aux mécanismes de transduction de signal et de régulation des processus cellulaires, Elles interviennent également dans la génération de mouvements, comme la myosine qui hydrolyse l'ATP lors de la contraction musculaire. Les pompes à ions des membranes cellulaires sont d'autres enzymes qui interviennent dans le transport actif transmembranaire. Des enzymes interviennent également dans des processus plus exotiques tels que la bioluminescence.

Les enzymes interviennent beaucoup dans la digestion humaine et on retrouvera nombre des enzymes digestives humaines durant les processus de maltage et l'empâtage (amylase et peptidases notamment).

Activité enzymatique

L'activité enzymatique est mesurée en katal (1 kat=1 mol/s) ou en unité enzymatique (1 U = $\mu\text{mol/min}$). Cette activité enzymatique ou vitesse d'action dépend de la concentration du substrat, de la température et du pH de la solution et souvent de la concentration des ions et de la présence de cofacteurs ou d'inhibiteurs.

Un brassin standard (60 minutes) nécessite une activité globale d'environ 3,2 moles par heure par litre, soit $5,34 \cdot 10^{20} = 534\,000\,000\,000\,000\,000$ réactions par seconde et par litre.

22.1.c. Cofacteurs et coenzymes

Certaines enzymes ont besoin de réagir avec d'autres éléments chimiques non protéiniques pour agir, ce sont des cofacteurs de la catalyse.

On trouve aussi des coenzymes, qui sont de petites molécules organiques qui peuvent être liés à des enzymes de manière plus ou moins lâche. Elles transportent des groupes fonctionnels ou des résidus d'enzymes d'une enzyme à l'autre.

22.1.d. Voie métabolique

Une **voie métabolique** est un ensemble de réactions chimiques catalysées par une série d'enzymes qui agissent de manière séquentielle. Chaque réaction constitue une étape d'un processus complexe de synthèse ou de dégradation d'une molécule biologique finale. Dans une voie métabolique, le produit de la réaction catalysée par une enzyme sert de substrat pour la réaction suivante.

Les voies métaboliques peuvent être linéaires, ramifiées (ou branchées), voire cycliques. Les composés initiaux, intermédiaires ou finaux produits dans ces voies sont appelés des métabolites. Les cellules vivantes comportent un grand nombre de voies métaboliques, souvent connectées les unes aux autres, qui constituent le réseau métabolique cellulaire.

Quelques voies métaboliques :

- **Glycolyse** (voie Embden-Meyerhof-Parnas) : c'est la voie principale de l'assimilation du glucose et de production d'énergie chez les êtres vivants. Nécessite du glucose et produit du pyruvate. C'est une série de 10 réactions.
- **Cycle de Krebs** : cette voie présente chez tous les organismes vivants aérobies permet d'oxyder les groupe acétyle (issu de la glycolyse ou d'autres voies) pour en récupérer l'énergie sous forme de 8 électrons à haut potentiel et d'ATP. C'est un cycle de 10 réactions.
- **Fermentation alcoolique** : qui à partir de la glycolyse va créer de l'éthanol et du dioxyde de carbone en 2 étapes successives (voir [chapitre plus bas](#)).
- **Synthèse des acides aminés**

22.1.e. Usages industriels

Quelques usages industriels d'enzymes :

- Biocarburants : cellulases et ligninases ;
- Lessive biologique : Peptidases, amylases et lipases ;
- Brassage : amylase, glucanases, peptidases, beta-glucanases et acétolactate décarboxylase ;
 - il s'agit là d'usage industriel donc d'ajout pas de l'utilisation des enzymes naturellement présentes dans le malt.
- Cuisson des aliments : papaine ;
- Industrie laitière : rennine et lipases ;
- Industrie papetière : xylanases, hémicellulases,, lignine et peroxydases.

22.2. Principaux enzymes du brassage

Dans le procédé de brassage la plupart des enzymes sont de la famille des **hydrolases**, enzymes qui travaillent par **hydrolyse**, c'est-à-dire qu'elles décomposent les éléments en consommant une ou plusieurs molécules d'eau. Les céréales crues, céréales maltées et les levures possèdent ou synthétisent leurs propres enzymes nécessaires a leur métabolisme.

On retrouve le travail des enzymes surtout à 3 étapes clés du brassage :

- Lors du [maltage](#), les enzymes naturellement présentes dans les grains participent à préparer la transformation des réserves d'énergies du grain (sous forme d'amidon) pour fournir de l'énergie nécessaire à la germination, puis à la jeune pousse.
- Lors de l'[empâtage](#) les enzymes présentes naturellement dans le malt (grâce au maltage) continuent leur travail de transformation de l'amidon pour le réduire en élément de plus en plus simple.
- Lors de la [fermentation](#) au travers des levures qui utilisent des enzymes pour réaliser la fermentation alcoolique et assurer leur métabolisme.

Pour chaque enzyme brièvement décrite ci-après est indiqué un lien vers wikipédia (informations générales) et un lien sur l'identifiant EC vers la base de données Brenda (base de données collaborative d'enzymes sous licence libre) qui donne une description précise de l'enzyme, de ses réactions, métabolisme et informations génétiques.

Identification EC

L'identifiant EC de l'enzyme est celui de « *Enzyme Classification* » qui classe les enzymes selon les réactions qu'elles catalysent avec des numéros d'identification hiérarchiques.

Tableau 26: Les 6 groupes de classification des enzymes

Groupe	Code	Type de réaction
Oxydoréductases	EC 1	Réaction d'oxydoréduction
Transférases	EC 2	Transfert d'un groupe fonctionnel d'un substrat à un autre
Hydrolases	EC 3	Hydrolyses
Lyases	EC 4	Rupture de différentes liaisons chimiques par des moyens autres que hydrolyse ou l'oxydation
Isomérases	EC 5	Isomérisations
Ligases	EC 6	Formation de liaisons covalentes couplées à l'hydrolyse d'un nucléoside triphosphate (généralement ATP).

Ainsi par exemple pour chaque niveau hiérarchique :

- EC 3 : Groupe des Hydrolases (enzymes agissant par hydrolyse)
- EC 3.2 : Groupe des Glycosilases, enzymes agissant par hydrolyse en découpant un sucre d'un polysaccharide ou nucléoside
- EC 3.2.1 : Sous-groupe des Glycosidases, enzymes agissant par hydrolyse sur des liaisons O ou L glycosidiques
- EC 3.2.1.1 : Enzymes Alpha-Amylase, enzyme agissant par hydrolyse de l'amidon en oligomères de glucose.

22.3. Enzymes du malt

22.3.a. Glucosidases

Catégorie EC : 3.2.1

Classe d'enzymes dites digestives, qui hydrolysent les liaisons glycosidiques de polymères de glucose. C'est une classe d'enzymes particulièrement importantes lors du brassage car ce sont ces enzymes qui libèrent les molécules d'amidon des cellules du grain et qui découpent les chaînes d'amidon en sucres plus simples.

C'est une famille d'enzymes courantes que l'on retrouve un peu partout en lien avec la transformation d'énergie du vivant. Constituant de la salive et des sucs gastriques chez les animaux (digestion), synthétisés par les fruits pendant leur maturation et les graines de céréales pendant leur germination. Lors de l'empâtage ce sont 2 de ces enzymes qui agissent surtout : alpha-amylases et bêta-amylases.

Alpha-amylase (ou Diastase)

Identification EC	3.2.1.1
Référence	wikipédia
Substrat	Amyloses et amylopectines
Produit	Maltoses, maltotriose, dextrines et glucoses.
Synthèse	Lors de la germination du grain
Action	Lors de l'empâtage
Optimum	65 °C (60 à 75 °C)

L' α -amylase brise les liaisons $\alpha(1 \rightarrow 4)$ glycosidiques à l'intérieur des longues chaînes de saccharides de l'amylose et de l'amylopectine pour donner des chaînes plus courtes et jusqu'au maltose (disaccharides de α -glucose) si les conditions et la durée le permet.

Elle agit de manière aléatoire à n'importe quel endroit des chaînes d'amylose ou d'amylopectine.

Pour l'amylopectine toutefois les amylases ne peuvent briser les liaisons peptidiques et reste alors des résidus (dextrines). Plus rapide que la bêta-amylase puisque plus polyvalente.

Autres usages : digestion chez les animaux

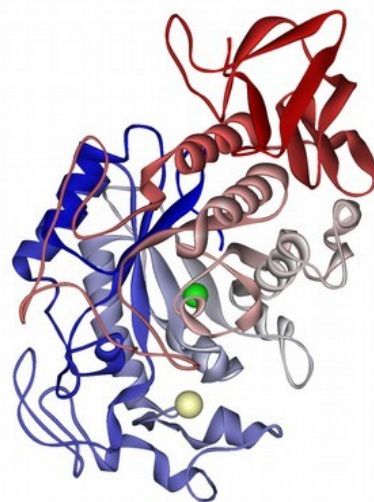


Figure 63: Alpha-Amylase salivaire humaine / source : wikipédia.fr

Bêta-amylase

Identification EC	3.2.1.2
Référence	wikipedia
Substrat	Amyloses (extrémités non réductrices)
Produit	Maltoses
Synthèse	Lors de la germination du grain
Action	Lors de l'empâtage
Optimum	60 °C (55 à 65 °C)

Son action est plus ciblée, elle brise les secondes liaisons $\alpha(1 \rightarrow 4)$ glycosidiques des extrémités non réductrices des chaînes d'amylose.

Attaque les chaînes de glucoses par les extrémités et y arrache 2 glucoses

(maltose). Déjà présente à l'état naturel dans les grains d'orge avant maltage mais en très faible quantité.

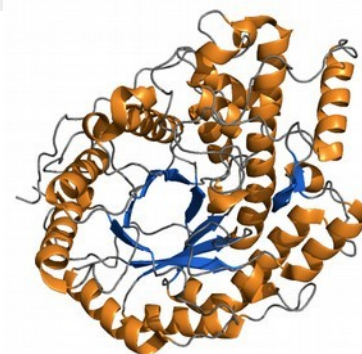


Figure 64: Bêta-amylase d'orge source : wikipédia.fr

Autres usages : digestion chez les animaux

(Limite) Dextrinases

Identification EC	3.2.1.142
Référence	wikipédia
Substrat	Amylopectines
Produit	Maltoses
Synthèse	Lors de la germination
Action	Lors du maltage et un peu à l'empâtage
Optimum	60 °C (30 à 70 °C)

Surtout active lors du maltage, résiste mal aux températures de cuisson de fin du maltage. Peut avoir un léger effet à l'empâtage en améliorant très légèrement le rendement.

Catalyse l'hydrolyse des liaisons osidiques α -D-(1 → 6) de l'amylopectine et du pullulane ainsi que des dextrines limites α et β , d'amylopectine et de glycogène.

Son action est incomplète sur l'amylopectine mais est complète sur les dextrines limites α . Le plus petit glucide qu'elle peut libérer à partir d'une liaison α -(1 → 6) est le maltose.

Bêta-glucanases

Identification EC	3.2.1.39 / 3.2.1.6
Référence	wikipédia
Substrat	Glucanes (polymère de glucoses)
Produit	Glucose
Synthèse	Lors de la germination
Action	Lors du maltage et un peu à l'empâtage
Optimum	45 °C (20 à 50 °C) / pH = 4,5 à 5,5

Agissent sur les glucanes (polysaccharides), participent à casser les cellules contenant les réserves d'amidons dans les graines et le son.

Autres usages : œsophage de certains herbivores pour la digestion des enveloppes de grains, œnologie et vinification.

Maltases (glucosidases)

Identification EC	3.2.1.20 / 3.2.1.21 / 3.2.1.39 / 3.2.1.58 / 3.2.1.74
Référence	wikipédia
Substrat	Maltoses et dextrines
Produit	Glucoses
Synthèse	Lors de la germination et par les levures
Action	Lors de l'empâtage et lors de la fermentation
Optimum	35 à 40 °C

La **maltase**, catalyse l'hydrolyse du maltose et des dextrines en glucose. Peu active lors de l'empâtage à cause de sa plage basse de température. Elle est aussi utilisée par les levures pour hydrolyser les maltoses présents dans le moût.

22.3.b. Cellulases et cytases

Un sous-groupe des Glycosidases est parfois séparés dans le brassage, il s'agit des cellulases qui s'attaquent aux autres polysaccharides du grain, notamment ceux constituant l'hémicellulose et la cellulose que l'on retrouve notamment dans l'enveloppe du grain.

La cellulose et l'hémicellulose sont constituées de fibre de polysaccharides non amylacées (contrairement à l'amidon) et donc totalement non fermentescible.

Soit principalement les polymères d'oses suivants :

- Cellulose, polymères de glucoses (donc proche de l'amidon mais avec un type de liaison bien différents qui en change radicalement les propriétés) ;
- Hémicellulose, composés de polysaccharides :
 - Mannanes, polymères de mannoses ;
 - Galactanes, polymères de galactoses ;
 - Xylanes, polymères de xyloses ;
 - Arabanes, polymères d'arabinoses.

Les Cellulases sont des enzymes contenues dans les graines de certaines plantes, en particulier les céréales, leur permettant de dissoudre la membrane de cellulose constituant les parois cellulaires. Leur action facilite donc l'accès à l'amidon.

Identification EC : **3.x**

Référence : [wikipédia](#) / [kegg](#)

[3.2.1.78](#) découpe la mannane

3.2.1.145, 3.2.1.164 découpe la galactane

xylane : xylanases

3.2.1.90 découpe arabane

Xylanases

Identification EC	3.2.1.8
Référence	wikipédia
Substrat	Xylanes (polymères de xyloses)
Produit	Xyloses (sucre du bois)
Synthèse	Lors de la germination
Action	Lors du maltage et un peu à l'empâtage
Optimum	

Les xylanases sont des enzymes qui catalysent l'hydrolyse des liaisons (1-4)-beta-D-xylosidiques dans les xylanes pour libérer du xylose. Elles interviennent dans la dégradation de l'hémicellulose, l'un des constituants des parois cellulaires des végétaux. Utilisés par les graines d'orge pour détruire les parois des cellules contenant les réserves d'amidon.

Autres usages : algues marines, protozoaires, escargots, crustacés, insectes.

22.3.c. Phosphoric mono-ester hydrolases

Catégorie EC : 3.1.3

Cette catégorie d'enzymes hydrolyse les phosphates mono-esters.

Phytases

Identification EC	3.1.3.8 / 3.1.3.26
Référence	wikipedia
Substrat	Acide phytique (stockage phosphore pour les végétaux)
Produit	Calcium non soluble, phosphates de magnésium
Synthèse	Lors de la germination
Action	Lors de l'empâtage

Optimum	40 °C (30 à 52 °C) / pH de 5,0 à 5,5 / Action très lente.
---------	---

Agissent en décomposant les acides phytiques présentent dans le malt, ce qui réduit les ions tampons et provoque une acidification de la maische. L'action de cette enzyme était surtout utilisée dans la région de Pilsner qui a une eau quasiment pas minéralisée et avait besoin d'acidifier la maische. Pour les autres régions et de nos jours, c'est plutôt l'inverse que l'on cherche réduire l'acidité. À Pilsen on traite désormais l'eau avec des sels minéraux pour obtenir le même résultat plus rapidement.

Autres usages : œsophage des ruminants, additifs alimentaires pour certains animaux d'élevage.

Phosphatases

Identification EC : [3.1.3.2](#) / 3.1.3.18 / 3.1.3.19 / 3.1.3.24 / 3.1.3.25

Référence : [wikipédia](#)

Une phosphatase est une enzyme dont la fonction est d'enlever un groupe phosphate d'une molécule simple ou d'une macromolécule biologique, par hydrolyse.

22.3.d. Aminopeptidases

Catégorie EC : 3.4.11

Catégorie d'enzymes qui dégrade les liaisons amino-peptides, qui compose notamment les protéines. Participent donc à la réduction des protéines en éléments plus petits, plus simples (peptides et amino-acides).

Peptidases (Protéases)

Identification EC	3.4.11.1 / 3.4.11.18 / 3.4.11.22
Référence	wikipédia
Substrat	Protéines
Produit	Azones et acides aminées libres
Synthèse	Lors de la germination (début du maltage)
Action	Durant le maltage, lors de l'empâtage
Optimum	50 °C (20 à 67 °C) / pH de 4,6 à 5,3

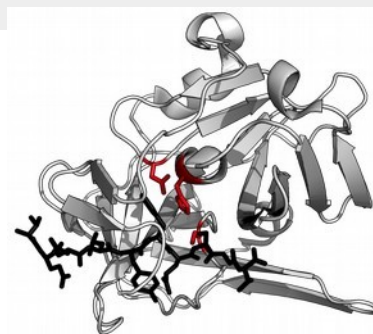


Figure 65: Protéase
source : Wikipédia

Les peptidases (ou protéases ou encore protéinases) sont des enzymes qui brisent les liaisons peptidiques des protéines. On parle alors de *coupure protéolytique* ou de protéolyse. Produit des azones et aminés libres. Les fonctions biologiques des protéases sont variées : elles interviennent dans la maturation des protéines, dans la digestion des aliments, dans la coagulation sanguine, dans le remodelage des tissus au cours du développement de l'organisme et dans la cicatrisation. Casse les protéines en morceaux plus petits. Participe à la réduction du trouble.

Autres usages : attendrir les viandes, lessives et solutions nettoyantes.

22.4. Enzyme des levures

Les levures utilisant des milliers d'enzymes pour leur métabolisme, sont ici présentés les principaux qui entre en jeu dans la fermentation alcoolique.

Décarboxylases

Identification EC : [1.1.1.184](#)

Référence : [wikipédia](#)

Les **décarboxylases** sont un groupe d'enzymes réalisant la décarboxylation d'acides aminés, d' α -cétoacides ou de β -cétoacides, c'est-à-dire qui catalysent une transformation chimique de ces acides aboutissant à la perte d'un groupe carboxyle (COO^-) et d'un ion H^+ .

Alcool déshydrogénases

Identification EC : [1.1.1.1](#) / 1.1.1.2 / 1.1.1.71

Référence : [wikipédia](#)

L'**alcool déshydrogénase (ADH)** est une enzyme (oxydoréductase) qui catalyse les réactions :

Alcool primaire + NAD^+ > aldéhyde + $\text{NADH} + \text{H}^+$;

Alcool secondaire + NAD^+ > cétone + $\text{NADH} + \text{H}^+$.

Il s'agit d'une famille d'enzymes qui permettent l'inter-conversion de certains alcools, et notamment l'éthanol, en aldéhydes et cétones, couplée à la réduction du NAD^+ en NADH . Chez l'humain et de nombreux animaux, l'alcool déshydrogénase est hépatique et participe à la détoxification de l'organisme par l'élimination des alcools toxiques. Chez les levures, les plantes et de nombreuses bactéries, les alcools déshydrogénases fonctionnent en sens inverse et produisent de l'alcool en générant du NAD^+ . C'est le processus de fermentation alcoolique, à la base de la biosynthèse de l'éthanol, utilisé dans la production du vin, de la bière, du cidre, ainsi que des agrocarburants.

Thiamine pyrophosphates

[2.7.6.2](#) : Thiamine diphosphokinase

https://fr.wikipedia.org/wiki/Thiamine_diphosphokinase

Transformation de la thiamine (vitamine B1) en Pyrophosphate de thiamine qui est un cofacteur à de nombreuses réactions clés du métabolisme.

[2.5.1.3](#) : Thiamine phosphate synthase

[3.1.3.100](#) : Thiamine phosphate phosphatase

22.4.b. Exemple schématique d'hydrolyse d'une chaîne de glucose

Ci-dessous un schéma simplificateur reposant sur le modèle obsolète de la « serrure-clé » mais permettant d'illustrer le fonctionnement de 2 enzymes important de l'empâtage : alpha-amylase et bêta-amylase.

L'amylase est la clé et vient « s'accrocher » à la chaîne de glucoses par une « géométrie » compatible (serrure). Entre en jeu une molécule d'eau qui permet à l'Amylase d'accélérer l'hydrolyse sur son site actif (noir) et d'y découper la chaîne de glucose a cet endroit. L'enzyme se libère et est prête à recommencer ailleurs.

Principe de fonctionnement de l'hydrolyse des chaînes glucoses par les enzymes Amylases

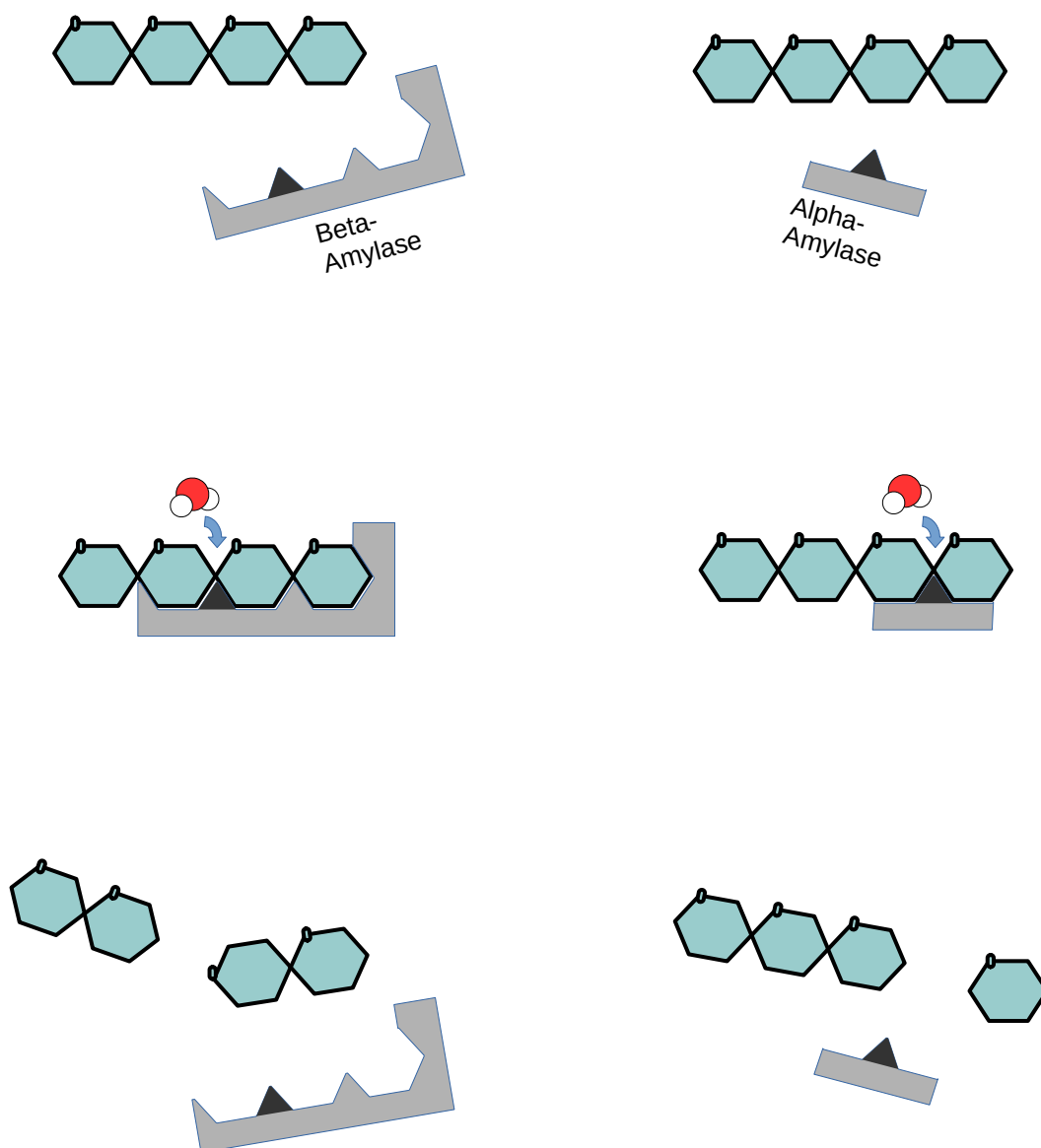


Figure 66: Principe de l'hydrolyse des chaînes de glucoses par les enzymes Amylases

23. Introduction à la biologie et biochimie des levures

Références : [wikipédia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Levure), [larsblog](https://larsblog.com) & milkthefunk.com

Les levures sont des êtres vivants unicellulaires de la famille des champignons. Bien avant que les abeilles, les levures ont été domestiquées par l'homme, sans même le savoir ; puisque les levures, par leur nature microscopique, n'ont été découvertes que bien plus-tard.

Les levures utilisées pour la bière ont la fabuleuse capacité de réaliser, dans certaines conditions, une fermentation alcoolique ; soit à produire de l'éthanol et du gaz carbonique à partir des sucres présents dans le moût. Cette capacité est réalisée par l'intermédiaire d'enzymes que la levure produit elle-même grâce à son code génétique.

23.1.a. Vocabulaire

On parle de **souche** lorsque les levures se présentent sous une forme « pure », c'est-à-dire des levures commerciale élevées industriellement, non polluées et présentant donc une seule espèce. Soit en condition de laboratoire.

On parle de **culture** lorsque les levures se présentent sous une forme contenant plusieurs espèces de levures, voir un mélange avec des bactéries. C'est le cas des Kveik par exemple ou des prélèvements effectués soi-même après fermentation.

On parle de **levures sauvages** (forcément sous forme de culture) lorsque les levures ne sont pas issues de la domestication par l'homme. On n'en trouve souvent sur la peau de fruits ou sur l'écorce des arbres par exemple.

Les **fermentations spontanées** (type Lambic) font appel à des cultures contenant un mélange de levures et de bactéries. Les levures ne sont pas sauvages, comme on pourrait le croire, elles sont présentes dans l'environnement de la brasserie. Ce sont des levures domestiquées.

Les levures dites **fermières** sont aussi des cultures, souvent complexes.

23.2. Le monde du vivant et les classifications biologiques

Il existe 3 grands modèles de classification du vivant, aucun n'a les faveurs de tous les scientifiques et les disputes sont légions ; les recherches toujours en cours et les contre-exemples compliquent les choses.

- Modèle des (3) **domaines** : Bacteria (Eu-bacteria), Archae (Archae-bacteria) et Eukaryota (Eucarya)
- Modèle des (2) **empires** : Procaryotes et Eucaryotes
- Modèle des (6 ou 7) **règnes** : Archae, Eu-bacteria, Protista, Fungi, Animalia et Plantae

Tableau 27: Règnes du vivant

Règne	Désignation vernaculaire	Type de cellule	Nombre de cellules	Alimentation	Stockage de l'énergie	Commentaire ou spécificités
Eubacteria	Bactéries	Procaryote	1			Histones dans le noyau
Archae	Archéobactéries	Procaryote	1			Sans histones
Protista	Protistes	Eucaryote	1			Certains découpent ce règne en protozoaires et chromistes.
Fungi	Champignons	Eucaryote	1 ou n	Hétérotrophe Osmotrophe	Glycogène	Séparé des végétaux « officiellement » en 1969
Plantae	Végétaux	Eucaryote	n	Autotrophe	Amidon	Paroi cellulaire : surtout cellulose et protéines
Animalia	Animaux	Eucaryote	n	Hétérotrophe	Glycogène	Collagène extracellulaire

Quelques définitions simples, pour s'y retrouver :

- Procaryote : organisme unicellulaire ne comportant ni noyau, ni organites ;
- Eucaryote : organisme unicellulaire ou pluricellulaire dont la ou les cellules comportant un noyau et souvent des organites. Voir définition ci-dessous ;

- Autotrophe : construisent de la matière organique, source d'énergie, à partir de minéraux et d'énergie extérieure.
- Hétérotrophe : puisent leur énergie directement dans leur environnement via les matières organiques préexistantes et disponibles.
- Osmotrophe : dissolution des aliments et transfert trans-membranaires par phénomène osmotique.

23.3. Taxonomie du vivant

La taxinomie est la classification hiérarchique du vivant. Encore une fois (comme les modèles) il existe plusieurs écoles et variantes, aucune ne détient la vérité. Il y a souvent dans le vivant des exceptions qui font que tel modèle ne convient pas totalement. Comme souvent en biologie les noms des éléments sont en latin ou d'origine latine.

Le plus souvent on trouve pour désigner un être vivant la hiérarchie suivante (en exemple la levure de fermentation haute) :

- Règne (Fungi)
- Division (Ascomycota)
- Classe (Saccharomycetes)
- Ordre (Saccharomycetales)
- Famille (Saccharomycetaceae)
- Genre (Saccharomyces)
- Espèce (Saccharomyces cerevisiae)
- Souche (Safale S-33)

23.4. Levures

Une **levure** est un champignon unicellulaire apte à provoquer la fermentation alcoolique des matières organiques animales ou végétales. Les levures sont employées, par l'homme, pour la fabrication du vin, de la bière, des alcools industriels, des pâtes levées, des antibiotiques et comme exhausteurs de goût (les extraits de levure peuvent servir comme agents de sapidité).

La dénomination « levure » découle de l'observation des fermentations et tout particulièrement celle qui a lieu durant la fabrication du pain : on dit communément et depuis longtemps que le pain *lève*. Ce n'est pas, à proprement parler, une dénomination scientifique. Mais l'importance des levures dans le domaine des fermentations conduit à conserver ce terme générique qui continue à être correctement perçu.

Ces micro-organismes, de forme variable selon l'espèce (sphérique, ovoïde, elliptique, en bouteille, triangulaire ou apiculée (renflée à chaque bout comme un citron)) mais généralement ovales, d'environ 6 à 10 µm et jusqu'à 50 µm, se multiplient par bourgeonnement ou par scission (scissiparité). Ils sont souvent capables d'accomplir une sporulation soit dans un but de dormance en milieu défavorable, soit dans un but de dispersion hors du milieu liquide.

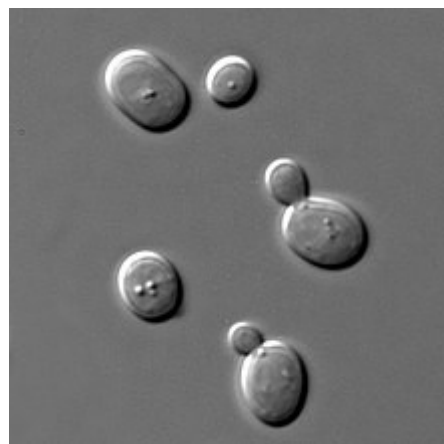


Figure 67: Bourgeonnement de levures

23.4.a. Champignon (fungi)

Le règne des **Fungi**, aussi appelés **Mycota** ou **Mycètes**, constitue un taxon regroupant des organismes eucaryotes appelés communément champignons. Ce règne constitue un large groupe diversifié, depuis des organismes microscopiques, invisibles à l'œil nu, micro-champignons unicellulaires (levures) ou pluricellulaires (moisissures), jusqu'aux « champignons supérieurs » dotés de « fruits » comportant le plus souvent un pied et un chapeau, que le promeneur récolte dans les bois.

23.4.b. Eucaryote

Les **Eucaryotes (Eukaryota)** sont un domaine du vivant regroupant tous les organismes, unicellulaires ou multicellulaires, qui se caractérisent par la présence, dans leurs cellules d'un noyau et généralement d'organites spécialisés dans la respiration, en particulier mitochondries chez les aérobies. On le distingue des deux autres domaines que sont les Eu-bacteria et des Archaea, qui eux sont de type procaryote, c'est-à-dire que leurs cellules sont sans noyaux, ni organites.

23.5. Structure

Les levures sont des micro-organismes eucaryotes ; ainsi possèdent-elles les caractéristiques structurales propres à ce type cellulaire et d'autres plus spécifiques aux levures elles-mêmes. Une levure comprend notamment :

- Une **paroi cellulaire** entourant la membrane plasmique et protégeant la levure des agressions physico-chimiques du milieu extérieur. Elle est constituée d'une couche externe de mannoprotéines, associés à des glucanes et une couche interne de glucanes associés à une petite quantité de chitine.
- Une **membrane cytoplasmique** composée principalement de phospholipides double couche (partie hydrophile à l'extérieur et partie lipophile à l'intérieur). Elle contient aussi de nombreux complexes protéiques intrinsèques et extrinsèques dont les rôles sont variés, par exemple des enzymes appelées protéases mènent les transports de substances du milieu extérieur vers le milieu intracellulaire et/ou inversement avec ou non transformation du substrat durant le passage.
- Un **noyau** contenant l'information génétique du génome chromosomique de la levure. C'est la présence d'un noyau qui différencie les cellules eucaryotes et procaryotes.
- Des organites, dont :
 - Des **mitochondries** qui jouent un rôle important dans la respiration aérobie de la levure et la production d'ATP.
 - Des **ribosomes** qui sont formées de complexes moléculaires (protéines et ARN) et qui fonctionne comme une chaîne d'assemblage et réalise la biosynthèse des protéines (et d'enzymes) à partir d'acides aminées.
 - Une ou plusieurs **vacuoles**, organites à l'aspect homogène, qui servent d'espaces de stockage pour diverses substances.

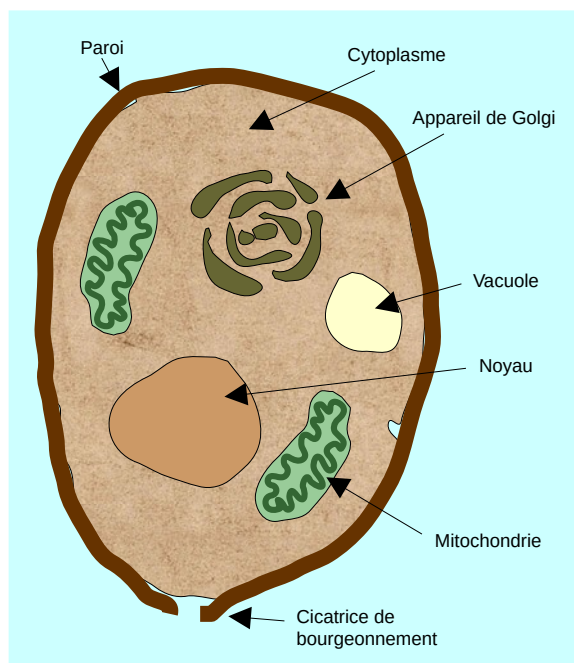


Figure 68: Anatomie d'une cellule de levure

23.6. Métabolisme

Voir : [Biologie du vin et de la bière \(planet-vie.ens.fr\)](http://planet-vie.ens.fr)

Les deux principaux processus énergétiques connus chez les hétérotrophes sont la respiration et les fermentations. Les levures utilisent les deux.

Pour leur développement ces levures ont besoin :

- de composés carbonés, source de carbone (énergie potentielle) ;
- de composés azotés, réduits sous forme d'ammonium ; quelques levures peuvent cependant utiliser des composés oxydés (comme les nitrates) ou organiques pour la biosynthèse des protéines et d'acides nucléiques ;
- d'éléments minéraux variés, vitamines et facteurs de croissance qui varient selon les levures.

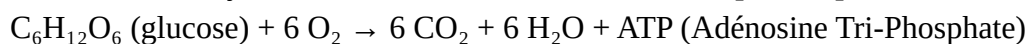
L'absorption de ces éléments vitaux met en jeu des phénomènes complexes. Ces nutriments doivent passer à travers la paroi cellulaire et la membrane plasmique. Une fois dans la cellule ces nutriments vont être dégradés et transformés par les enzymes qui y sont présents. Certaines enzymes peuvent sortir de la cellule pour effectuer leurs travaux préparatoires dans le milieu extra cellulaire (le moût).

Ce n'est qu'une fois dégradé (rendu exploitable) que ces nutriments vont être utilisés réellement, là encore souvent par le biais d'enzymes. Ces enzymes sont produits par la levure dans leurs ribosomes à partir d'informations codées dans leur ADN et des éléments de bases pour la construction des briques des protéines (acides aminés).

Toutefois ces voies métaboliques sont ci-après très simplifiées, ne présentant que l'équation chimique de base utilisant du glucose. Toutefois la réalité est bien plus complexe, car les levures peuvent aussi assimiler d'autres sucres, qui nécessitent d'autres voies ou a minima une préparation (décomposition en glucose). A cela s'ajoute toutes les autres voies chimiques qui crée ou consomme d'autres éléments, le tout aboutissant à des mécanismes chimique et biochimique très complexe. L'élément essentiel étant là encore les enzymes.

23.6.a. Respiration (dite aérobie)

Toutes les levures sont capables de dégrader le glucose, le fructose et le mannose en présence d'oxygène, par un métabolisme oxydatif, conduisant à la formation de CO₂ et d'H₂O.



Cette voie métabolique est très énergétique et permet aux cellules de subir une multiplication avec un rendement cellulaire élevé (le rendement étant défini par le quotient de la quantité de cellules fabriquées par le substrat sucré consommé). En plus des sucres simples, certaines levures peuvent utiliser d'autres glucides (mono, di ou tri-saccharides, voire des polysaccharides) mais aussi des alcools, des acides ou des alcanes.

D'une manière plus générale, elles ont une capacité hydrolytique (hydrolyse de leur nutriment) bien moindre que les moisissures.

23.6.b. Fermentation alcoolique (dite anaérobie)

En plus du métabolisme oxydatif, les levures peuvent privilégier une dégradation des glucides par un métabolisme fermentatif qui conduit à la formation d'éthanol et de CO₂ suivant la réaction :



En plus de ces composés majoritaires, des alcools supérieurs, des aldéhydes, des esters, des acides... sont formés en plus petites quantités et participent qualitativement de façon importante et complexe à la formation des saveurs des boissons fermentées. Ce métabolisme est moins énergétique que le métabolisme oxydatif. Le rendement de la multiplication cellulaire en est affecté, bien que la vitesse de croissance, au final, puisse être nettement plus rapide que dans le processus oxydatif. Ce processus de fermentation peut fonctionner en présence d'oxygène (conditions aérobies) ou en absence partielle ou totale d'oxygène c'est-à-dire également en conditions anaérobies (l'oxygène n'entrant pas en jeu dans les mécanismes de la fermentation).

23.6.c. Effet Crabtree

Cet effet exprime une tendance au gaspillage du substrat carboné (glucose par exemple) quand ce substrat est présent en grandes quantités, comme c'est le cas dans le moût en début de fermentation. Cet effet permet de comprendre dans quelles conditions l'une des deux voies métaboliques décrites ci-dessus va être choisie.

Ce métabolisme favorise donc la fermentation alcoolique par rapport à la respiration aérobie lorsque la concentration de sucres simples est importante (typiquement à partir de 100 mg/l et surtout à partir de 200 mg/l) ; ce qui signifie que les levures favorisent la consommation des sucres sur le rendement énergétique. Toutefois ce choix métabolique induit aussi une croissance plus rapide ce qui compense un peu le plus faible rendement.

La fermentation alcoolique est aussi mise en œuvre quand l'oxygène vient à manquer, ce n'est plus un choix, c'est alors une obligation.

23.6.d. Conditions de croissance

Température

Chaque levure a une plage de température idéale et toutes sont peu résistantes à de haute température. Généralement elles meurent à partir de 50 °C. La pasteurisation détruit les levures et la plupart des bactéries.

Le froid réduit leur croissance et la congélation conduit à une mortalité importante.

Hydratation

Pour voir leur métabolisme fonctionner, les levures ont besoin d'être dans une solution aqueuse permettant d'accéder aux différents nutriments. Lyophilisées elles sont en « veille » (sporulation) et la mortalité survient petit à petit.

Acidité

Les levures ont des enveloppes cellulaires imperméables aux ions H_3O^+ et OH^- , ce qui les rend assez peu sensibles à l'acidité de la solution.

Éthanol

Bien que ce soit un produit de leur métabolisme (lors de la fermentation), l'éthanol est un poison pour les levures et leur résistance dépend de la souche et de la concentration en éthanol.

Saccharomyces bayanus serait une des plus résistantes dans ce domaine.

Sulfites

Ont un effet inhibiteur sur les levures (moins que sur les bactéries).

23.6.e. POF (Phénols)

POF est l'acronyme de « Phenolic Off Flavor » (flaveurs phénoliques). On qualifie les souches de levures de POF+ (favorise les arômes phénoliques) ou POF- (ne produit pas ou peu d'arômes phénoliques). Ces arômes phénoliques (caractérisés principalement par une flaveur de clou de girofle) sont souvent indésirables, mais favorables pour certains styles (allemands ou belges notamment). Elles sont désormais plutôt identifiées par leur gène spécifique STA1+.

Ce sont généralement les levures plus sauvages ou rustiques qui sont POF+, alors que les souches commerciales sont le plus souvent POF-. La domestication aurait plutôt sélectionné les POF-.

Cette capacité provient de la possibilité pour la levure de transformer l'acide férulique (contenu dans le malt d'orge ou de blé) en phénol (4-vinyl gualacol).

Une température élevée tend à augmenter la conversion phénolique des levures POF+.

23.6.f. Souches diastasiques

Certaines souches sont dites « diastasiques » car capables de digérer certains sucres plus complexes, comme les dextrines ou le maltotriose. Génétiquement cela correspondait à une variante spécifique : *Saccharomyces cerevisiae* var. *Diastacus*. Longtemps elles ont été considérées comme indésirables.

Elles ont tendance à être de type POF+ et à produire un peu de co-produits spécifiques : acétaldéhyde, dioxyde de soufre, isoamyl acetate (esters à la flaveur de bananes) et parfois des diacétyles.

23.6.g. Esters

Les esters aromatiques sont importants dans certains styles de bière et apportent diverses flaveurs.

Les principaux esters :

- Acétate d'éthyle (fruités, solvant) :
https://fr.wikipedia.org/wiki/Ac%C3%A9tate_d%27%C3%A9thyle

- Acétate d'amyle (fruités, banane)
- Acétate d'isobutyle (ananas)
- Hexanoate d'éthyle et Octanoate d'éthyle (pomme acide)
- phenyl ethyl acetate (fleurs, miel)

Ils sont détectables par l'homme avec des concentrations très faibles (souvent à partir de 0,2 ppm).

Leur production dépend de la souche de levure et de la température de fermentation (les températures élevées tendant à augmenter leur production).

La présence de « trub » (résidus des cassures dans le moût) réduirait la production des esters.

23.6.h. Dessication

La levure comme toute cellule vivante se repose structurellement sur sa membrane cytoplasmique (composés principalement de lipides). Si cette membrane vient à se dégrader, la cellule va se détruire. Cette structure lipidique nécessite de l'eau pour s'auto-entretenir, car c'est surtout l'eau qui lui permet de se maintenir. La dessication est donc problématique ; toutefois cela a toujours été un moyen de conservation ancien (bâton de brassage) et présent (levure sèche).

Les levures plus rustiques (souvent classé comme Kveik) ont conservé un moyen ancien de se protéger de la dessication en synthétisant un sucre le tréhalose qui permet de remplacer partiellement l'eau pour aider à maintenir la structure lors de la dessication. Les levures modernes ont perdu une partie de cette capacité au profit d'une amélioration des performances (notamment les performances d'utilisation du maltotriose et du maltose).

23.7. Levures de fermentation utilisées par l'homme

On l'a vu, les levures sont utilisées par l'homme depuis la nuit des temps, principalement pour leur capacité de fermentation alcoolique (même si pour le pain, l'alcool s'évapore durant la cuisson).

La levure la plus utilisée par l'homme, reste de loin *Saccharomyces cerevisiae* (voir détails de son métabolisme plus bas). Toutefois dans le brassage notamment (mais aussi pour le vin) d'autre genre de levures sont utilisées parfois en association, en mélange (blend) ou seule.

Ceci a toujours existé, même avant que l'on découvre les levures, car par nature ces levures (et d'autres) partagent des habitats communs et ont des fonctions similaires. Leur genre les sépare définitivement et leur métabolisme est parfois différent.

En savoir plus : [Larsblog](#)

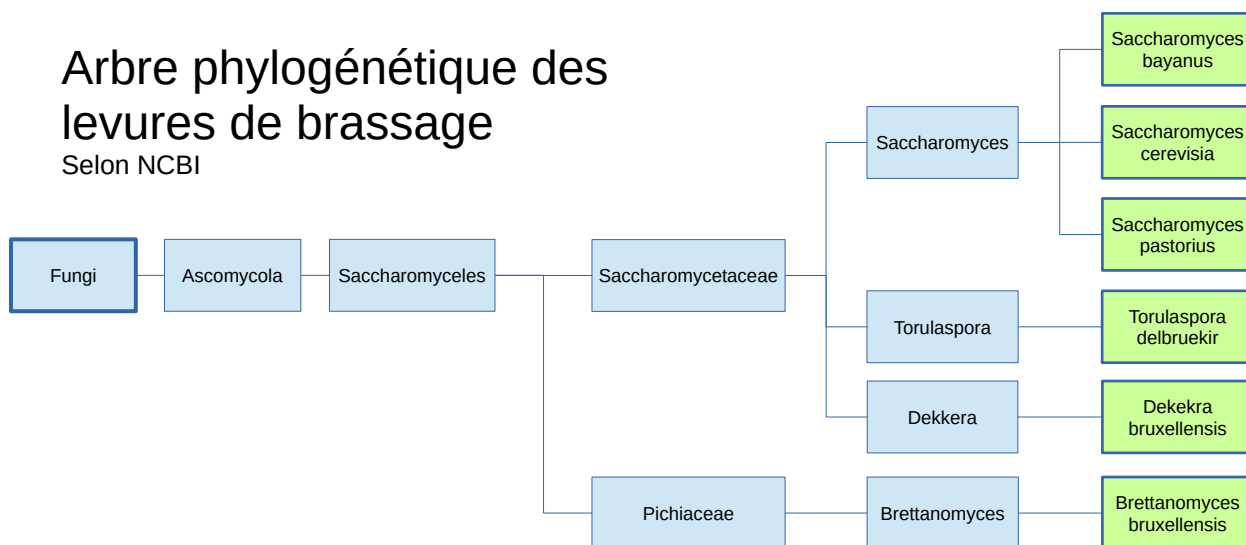


Figure 69: Arbre phylogénétique des levures de brassage

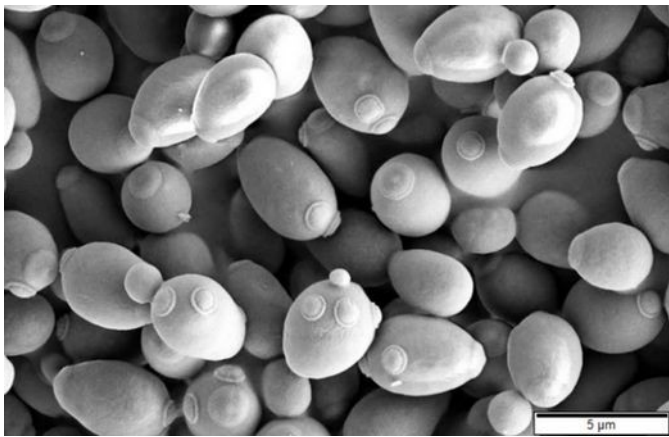
Ci-dessous des chapitres dédiés aux genres les plus utilisés et connus.

Historiquement et dans la nature ces différentes levures coexistent et entraînent toutes dans la fabrication des bières (ou proto-bières). Ce n'est que depuis leur production industrielle que ces genres peuvent être séparés. Originellement les levures étaient utilisées en culture (mélange de levures et de bactéries). Les références indiquées ci-dessous sont celles de Wikipédia (encyclopédie), NCBI (taxonomie du vivant) et EOL (Encyclopedia of Life).

23.7.a. Saccharomyces

Références : milkthefunk.com & Larsblog

Saccharomyces cerevisiae

Genre	Saccharomyces cerevisiae	 source : EOL
Famille	Saccharomyces	
Nom vernaculaire	Levure de boulanger Levure à boutons Levure à bière	
Fermentation	Haute (Ale)	
Références	Wikipédia NCBI (taxonomie) EOL	
Habitat naturel	Peau des fruits Écorces et feuilles d'arbres	
Description	Desm. 1827 / Meyer 1838	
Usages	Brasserie, vinification et panification	

Saccharomyces cerevisiae est la levure historiquement utilisée en brassage et panification. C'est probablement la plus étudiée scientifiquement. On en connaît des milliers de souches.

Son nom est construit sur les racines grecques *saccharo* (sucre), *myces* (champignon) et le mot latin *cerevisiae* (cervoise, mot d'origine gauloise désignant la bière).

Cette levure se présentant sous forme de cellules isolées, ovoïdes arrondies, longues de 6 à 12 µm et larges de 6 à 8 µm. À l'état naturel, on retrouve *Saccharomyces cerevisiae* principalement sur les fruits comme les raisins et sur la grande majorité des écorces d'arbres (par exemple sur le chêne).

Il a été démontré que les princesses des guêpes sociales (le Frelon européen et les Polistes notamment) constituaient un réservoir naturel de *Saccharomyces cerevisiae*. En effet, celles-ci abritent des cellules de levure dans leur intestin pendant l'hivernation (de l'automne au printemps) et les transmettent à leur progéniture lors de la fondation de leur nid. Ces guêpes permettent alors la survie des souches de levures pendant les saisons défavorables et servent de vecteurs disséminant les levures vers des cibles appropriées telles que des fruits mûrs à la fin de l'été.

Cette levure est très étudiée et nous disposons pour elle de très nombreuses recherches et une littérature abondante. Ainsi le site internet Yeast Genome (yeastgenome.org) présente le génome complet de très nombreuses souches de cette levure.

Cette importante littérature est due à 2 choses : cette levure est la plus utilisée pour la fermentation alcoolique (bière, vin, pain...) et est cultivée industriellement ; mais c'est aussi une levure particulièrement stable, non dangereuse et qui se reproduit vite. Ce qui en fait un modèle idéal pour certaines études scientifiques.

Domestication

De nombreux auteurs parlent de domestication au sujet de cette levure, car le développement et l'évolution de cette famille est grandement lié à l'homme. De par son usage par l'homme (brassage, vinification et panification) cette levure a coévolué par les usages et des espèces se sont spécialisées. Un peu comme les abeilles dont on trouve des espèces domestiquées (en ruche) mais où existent encore des espèces sauvages variées (abeilles sociales sauvages, abeilles solitaires...)

Ainsi les levures de boulanger et de brassage ce sont adaptés à leur usage (environnement créer par l'homme). Des souches ont été sélectionnées par l'homme (sans le savoir) par l'usage. Par exemple le bâton de brassage qui faisait sécher les levures avant le brassage suivant, a sélectionné des levures ayant un bon pouvoir de dessiccation. Depuis le 19^e siècle la culture industrielle de souche pure a encore renforcé la sélection et la spécialisation des levures de brassage.

En savoir plus sur l'histoire des levures : Petite histoire des levures

Cycle de vie

Saccharomyces cerevisiae est capable de se multiplier sous deux formes : une forme diploïde ($2n = 32$ chromosomes) et une forme haploïde ($n = 16$ chromosomes).

Le cycle cellulaire de *Saccharomyces cerevisiae* est très stéréotypé et peut s'accomplir de deux manières : par reproduction asexuée (forme haploïde) ou par reproduction sexuée (forme diploïdes). Les cellules haploïdes se multiplient en bourgeonnant : la cellule mère bourgeonne d'une cellule fille plus petite (mitose), possédant la même information génétique. Il existe des cellules haploïdes « *a* » et des cellules haploïdes « *α* » qui correspondent à des signes sexuels distincts. Ces deux types de cellules ne se distinguent pas morphologiquement mais par la phéromone qu'elles produisent : MATa ou MATα. Les phéromones libérées permettent l'amorce du processus de fécondation en se liant à un récepteur spécifique. Ensuite c'est la fusion entre une cellule « *a* » et une « *α* » qui donne naissance à une cellule diploïde « *a/α* ».

Tant que l'environnement est favorable, le diploïde se multiplie par bourgeonnement. Si les nutriments viennent à manquer, la cellule repasse en phase haploïde par un processus de méiose. On obtient finalement quatre noyaux haploïdes qui sont inclus dans les spores (ascospores) contenues dans un sac appelé asque. L'enveloppe de l'asque se rompt à maturité et libère alors deux cellules « *a* » et deux cellules « *α* » qui peuvent recommencer le cycle.

Les souches industrielles sont souvent polyploïdes (3, 4, 5n chromosomes) et donc possèdent plusieurs gènes pour un même caractère. Elles sont donc plus stables génétiquement car difficiles à faire muter. La plupart de ces souches sont incapables de sporuler dans les conditions de culture industrielle et se reproduisent par bourgeonnement uniquement.

Saccharomyces pastorianus

Genre	Saccharomyces pastorianus Saccharomyces carlsbergensis	
Famille	Saccharomyces	
Nom vernaculaire	Levure lager Levure de fermentation basse	
Fermentation	Basse (Lager)	
Références	Wikipédia NCBI (taxonomie) EOL	
Habitat		
Description	Reess. 1870 / Hansen 1883	
Usages	Brasserie Vinification	

Une vingtaine de souches connues.

Son nom lui a été donné en hommage à Louis Pasteur, postérieurement connu sous la dénomination Carlsbergensis car (re)découverte dans les laboratoires de la brasserie Carlsberg 13 années plus tard où sa production industrielle a commencé. Historiquement très lié à la culture brassicole Bavaroise (avant la découverte des levures) depuis le 14^e siècle. Ces souches produisent une fermentation dite basse et des bières de type Lager.

L'origine exacte de ce genre est source de débat. Si, il est à peu près sûr que *Pastorianus* est une hybridation entre *Cerevisia* et une autre levure, cette autre levure reste incertaine, même si la plus probable candidate semble être *eubayanus*.

Ce genre résiste moins aux taux d'alcool élevés et travaille mieux à des températures basses.

Saccharomyces uvarum

A priori, pas utilisé pour le brassage, plutôt le vin et le cidre.

Genre	<i>Saccharomyces uvarum</i>	
Famille	<i>Saccharomyces</i>	
Nom vernaculaire		
Fermentation		
Références	wikipédia NCBI (taxonomie)	
Habitat		
Description	Beij. 1898	
Usages	Cidre Vinification	

Saccharomyces eubayanus

Probable ancêtre (avec *Cerevisia*) de *Pastorianus*. Levure préférant les basses températures et découverte en 2011 sur des écorces d'arbres en Patagonie, puis en 2014 sur les plateaux du Tibet et en Chine. Depuis on en a trouvé dans plusieurs régions froides du monde : États-Unis, Chili, Nouvelle-Zélande... La thèse la plus probable pour expliquer l'hybridation serait que *Eubayanus* a parcouru la route de la soie, depuis le Tibet jusqu'à la Bavière...

Elle a la particularité d'être bien tolérante au froid (ce dont a hérité *Pastorianus*) et fonctionne de 4 à 25 °C. Toutes les souches semblent fermenter le glucose et le fructose, certaines le maltose et peu ou pas les sucres plus complexes. La plupart seraient POF+.

À ce jour il n'existe aucune souche commerciale, c'est une levure qui n'est donc pas domestiquée.

Kveik et landrace yeast (hot & fast)

Référence : [milkthefunk](#), [lars garshol blog](#)

Sous cette dénomination, non scientifique, se cache des cultures domestiquées, mais un peu plus sauvage, de *Saccharomyces*.

Historiquement ce sont les levures fermières d'Europe du Nord que l'on nomme Kveik (Norvégien). Par extension on dénomme parfois ainsi, toute une famille de levures aux caractéristiques proches (Farmhouse ou landrace yeast).

Ce ne sont pas des souches pures (comme les levures commerciales) mais plutôt un mélange de plusieurs souches de *saccharomyces*, mélangé parfois avec d'autres micro-organismes.

Elles s'écartent des *saccharomyces* commerciales, notamment par leur habilité à travailler à des températures hautes (parfois jusqu'à 40 °C). Elles ont souvent en rendement un peu plus faible, notamment plus de mal à digérer les maltotriose (3 glucoses).

Elles sont par contre très rapides et fermentent en quelques jours. Elles se conservent bien par une dessiccation simple.

À température normale (pour des *saccharomyces*) elles ont une fermentation très propre (très peu de sous-produits) et à température haute développent des arômes de fruits exotiques plus ou moins marqués.

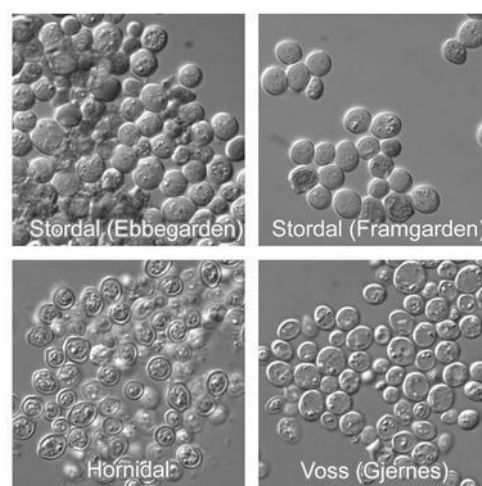


Figure 70: Plusieurs cultures mixtes de Kveik

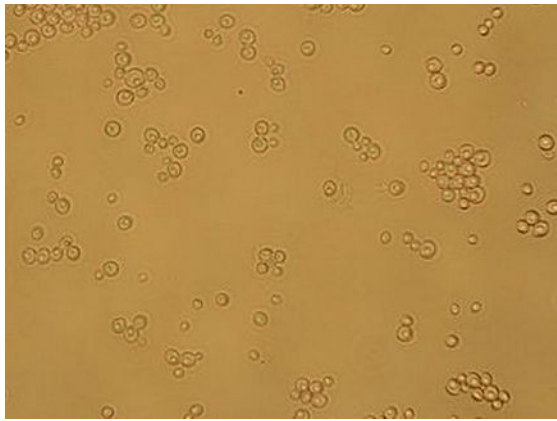
Leur origine et variations provient probablement de leur origine rustique pré-industrielle et d'une hybridation. Elles étaient utilisées traditionnellement dans les fermes Norvégiennes pour un usage local. Empâtage long (réduction des maltotrioses) et parfois sans ébullition. Les levures étaient conservées (mis au repos) sur un bâton ou anneau de brassage pourvu de trous puis séchées avec de la farine. Cela pourrait avoir développé leur capacité de dessiccation ou elles auraient gardé cette caractéristique sauvage. Dans cet usage traditionnel on a plutôt affaire à des cultures mixtes (plusieurs levures et souvent accompagné de bactéries).

La fermentation Kveik, bien que varié suivant les cultures, a tendance à dégager des esters et peu de phénols, sans fusels. Elles sont aussi souvent très tolérantes à l'éthanol et ont une floculation importante. Les bières produites traditionnellement sont souvent peu pétillantes et consommé peu de temps après fermentation.

On trouve des « Kveik » commerciale désormais, mais il s'agit souvent de culture pure (1 seule souche). En savoir plus :

- [Traditionnal norwegian Kveik are genetically distinct group of domesticated saccharomyces cerevisiae](#)

23.7.b. *Torulaspora delbrueckii*

Genre	<i>Torulaspora delbrueckii</i> anciennement <i>saccharomyces delbrueckii</i>	
Famille	<i>Torulaspora</i>	
Nom vernaculaire		
Fermentation	Haute	
Références	Wikipédia NCBI (taxonomie)	
Habitat	Fruits	
Description	Lindner 1904	
Usages	Vinification Panification Brasserie	

Source : Wikipédia

1 seule souche décrite.

23.7.c. *Brettanomyces* (*Dekkera*)

Le genre *Brettanomyces* est aussi appelé *Dekkera*, ces 2 noms proviendrait originellement de leur 2 modes de reproductions (sexuées et asexuées) qui leur donne une apparence différente, mais il s'agit bien du même organisme. Cette famille de levures est une cousine des *saccharomyces*, elles se seraient séparés il y a 200 millions d'années.

Ces levures peuvent apporter à la bière, une sécheresse importante ou une acidité fine, elles ont tendance à métaboliser tous les sucres présents.

En fermentation primaire, elles apportent le plus souvent des saveurs délicates.

En fermentation secondaire, elles apportent des saveurs plus fermes.

Peuvent acidifier (acide acétique) en présence d'oxygène. Une acidification plus complexe qu'un simple acide (même bactérien).

Biblio : « *Brettanomyces* *Bruxellensis*, Essential contributor in spontaneous beer fermentation providing novel opportunities » (université de Louvain)

Brettanomyces bruxellensis

Genre	<i>Brettanomyces bruxellensis</i>	
--------------	-----------------------------------	--

Famille	Brettanomyces	Source : wikipédia
Nom vernaculaire	Bretts	
Fermentation	Spontanée	
Références	Wikipédia NCBI (taxonomie) EOL	
Habitat		
Description	Van der walt 1964	
Usages	Brasserie Vinification (très peu) Fromage	

3 à 5 souches connues.

Découvert vers 1889 dans la brasserie de Guinness et décrite comme produisant le goût typique Anglais, d'où le nom Brettanomyces : Bretta de « Britain » et myces (champignon). Brettanomyces était utilisé par les brasseurs anglais (sans le savoir) en culture mixte avec Saccharomyces (c'est souvent le cas dans la nature, les 2 levures étant proches et colonisant les mêmes niches écologiques).

Considéré comme indésirable dans le vin et dans la majorité des styles de bière. Toutefois indispensable pour certains styles belges et anglais ; notamment les Lambics, Gueuze, Rouge des Flandres (styles qualifiés de fermentation spontanée). Naturellement présente dans les barriques de vieillissement de ces bières. De nos jours parfois utilisé pour la refermentation en bouteille.

Produit des saveurs acidulées, parfois décrite comme « couverture de cheval », « cuir mouillé ». De nos jours parfois utilisé en secondaire pour certaines bières artisanales.

Surtout utilisé en fermentation secondaire.

Les brets sont capables d'assimiler des sucres un peu plus complexe (cellulobiose, dextrines) que saccharomyces cerevisiae, produisant généralement un taux d'alcool plus élevé et moins de sucres.

Elles peuvent produire des esters, des phénols et des acides acétiques.

En savoir plus :

- <http://www.milkthefunk.com/wiki/Brettanomyces>
- <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/j.2050-0416.1904.tb04656.x>

Brettanomyces clausenii

Brettanomyces anomalus

Brettanomyces lambicus

23.7.d. Levures sauvages

Sont ainsi nommés des levures ou autres organismes vivants non désirés dans le moût et qui généralement apportent des saveurs non désirées. Cette définition reste floue car certains organismes peuvent être considérés indésirables pour certains styles et indispensables pour d'autres (c'est le cas des Brettanomyces et Torulasporavus plus haut). Ainsi certaines sont désormais cultivées industriellement (dans le but généralement d'avoir des souches pures), ce qui est paradoxal pour des levures dites « sauvages ».

Dans le milieu brassicole on a tendance à nommer « levure sauvage » les organismes provenant de la nature. On trouve ce type d'organismes notamment sur la peau des fruits mûrs et aussi dans les fleurs au printemps. Ce peut être des levures ou des bactéries.

Certaines études ont démontrés que certaines levures, rencontrés autour des brasserie, sont en fait des levures de la brasserie qui se sont « échappées » de la brasserie.

Source de levures sauvages connus : figues, dattes, raisins, framboises, pommes, kiwi, prunes, myrtilles, cassis...

A finir

Saccharomyces diastaticus

Est une levure saccharomyce indésirable (variante de cerevisiae) car elle est capable d'hydrolyser des dextrines et donc produire un très haut rendement de fermentation se traduisant en secondaire par du gushing et une réduction des saveurs.

23.8. Bactéries

Les bactéries (procaryotes) sont des organismes vivants primitifs. Ils sont formés d'une enveloppe contenant une « soupe », un mélange d'éléments non organisés. Contrairement aux autres cellules vivantes (eucaryotes) la cellule (unique) ne contient pas de noyaux ou d'organites différenciées.

Les bactéries sont essentielles à tous les écosystèmes (y compris le corps humain qui contient plus de bactéries que de cellules humaines).

Les bactéries jouent aussi un rôle dans la fermentation de la bière, notamment les styles dits à « fermentation spontanée ». On trouve notamment les genres Enterobacter, Klebsiella, Shigella et Hafnia.

Pour la majorité des styles de bière, les bactéries sont toutefois à éviter et souvent considérés comme indésirable.

On distingue les bactéries en 2 grandes classes dites gram-positive (qui se colore avec le colorant de Gram et ont une paroi plus fine) et gram-négative. Le houblon ne permet pas aux bactéries gram-positives de se reproduire, ce qui limite leur infection.

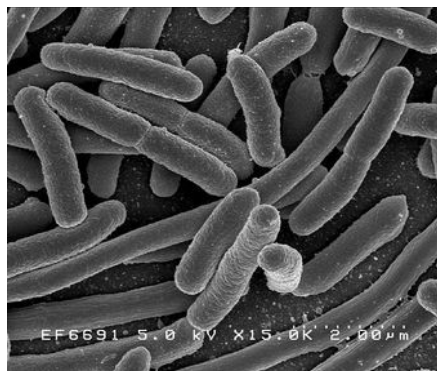


Figure 71: Bactéries
source : wikimedia commons

23.8.a. Acetobacteraceae

Bactéries produisant de l'acide acétique. Utile à petite dose pour le Lambic et les Rouges de Flandres.

23.8.b. Lactobacillus

Source : [wikipédia](#), [milkthefunk](#)

Bactéries produisant de l'acide lactique, présente naturellement dans les céréales. C'est un acide plutôt propre et qui apporte beaucoup à certains styles nécessitant un acidifiant (Berliner weiss, Gose ou Lambic par exemple). On retrouve cette famille de bactéries dans les yaourts ou les fromages notamment.

Très sensible à la présence du houblon. Réduit les protéines et donc minimise la tenue de la mousse.

23.8.c. Pediococcus

Source : [wikipédia](#), [milkthefunk](#)

Un genre proche des lactobacillus mais aussi des diacétyles, majoritairement indésirable.

Produit une acidité rugueuse qui devient plus douce après 4 à 6 mois de fermentation.

Souvent utilisé avec Brettanomyces qui réduit les diacétyles produits.

Présente sur les fruits et les végétaux.

Vocabulaire

Souche (strain) : il s'agit d'une « famille » spécifique d'une levure, le plus souvent entendu comme « pur », c'est-à-dire composés d'un seul type de levure génétiquement compatible (une seule espèce).

Culture (culture) : il s'agit d'un milieu « vivant » (ou endormi) contenant des millions d'individus et souvent composés de plusieurs souches, voir de plusieurs espèces. Le moût en fermentation est considéré comme une culture et contient généralement d'autres êtres vivants que la levure qui a été placé par le brasseur, souvent d'autres levures voir d'autres bactéries.

24. Annexes

Liste des annexes

24. Annexes.....	165
24.1. Mesures et unités de mesure.....	165
24.1.a. Systèmes de mesure et bases.....	165
24.1.b. Unités générales.....	167
24.1.c. Unités liées à la chimie.....	176
24.1.d. Unités spécifiques du brassage.....	180
24.2. Gérer les volumes.....	188
24.2.a. Gérer les transferts.....	188
24.2.b. Gérer le volume.....	188
24.2.c. Optimiser son brassin.....	191
24.3. Propriétés physico-chimiques.....	192
24.4. Constantes.....	193
24.5. Index des figures et tableaux.....	194

24.1. Mesures et unités de mesure

Ce chapitre reprend les principales unités de mesures que nous rencontrerons et les places dans un contexte à la fois scientifique et dans la cadre du brassage amateur.

24.1.a. Systèmes de mesure et bases

Systèmes de mesure

Les unités de mesures utilisés lors du brassage devrait être, comme toutes les unités de nos jours, exprimés dans le SI ou **Système International** ([wikipédia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Système_International)), qui est la norme scientifique mondiale. Toutefois pour des raisons historiques et aussi parce que le monde anglo-saxon utilise encore beaucoup les mesures dites « impériales », on trouve encore d'autres systèmes de mesure. De plus le monde du brassage, comme la cuisine, utilise certaines mesures du quotidien plus courantes (dites parfois « apothicaire »). Et pour finir le monde du brassage a « inventé » certaines unités de mesures spécifiques à son domaine, notamment pour des éléments très particuliers ou qui relève parfois plus de l'appréciation que de l'objectivité.

Il y a donc un mélange d'un peu tout, ce chapitre est là pour donner un petit fond historique, préciser ces notions et permettre les conversions nécessaires (notamment pour convertir des recettes d'origine américaines).



Figure 72: Illustration : [wikipédia.fr](https://fr.wikipedia.org/wiki/Système_International)

Bases

Les unités du SI sont définies dans le système dit « métrique », qui associent des sous et sur unités par un ordre de grandeurs de 10 (base 10). C'est la base de comptage courante, utilisé par l'ensemble de l'humanité de nos jours.

Dans le système dit « impérial » (utilisé par une partie du monde anglo-saxons) les divisions sont souvent des fractions, typiquement 1/2, 1/4, 1/8, 1/16... Si ce système paraît plus complexe aujourd'hui, il permettait de faire certains calculs rapidement sans aucune calculatrice, de par le plus grand nombre de diviseurs disponible. D'où sa conservation d'usage encore aujourd'hui, surtout aux États-Unis.

Enfin, il nous reste des traces du système de numération a base 60 des civilisations mésopotamiennes, avec les mesures relatives au temps ou aux angles. Le système à base 60 présente l'avantage de comporter beaucoup de diviseur, ce qui permet de faciliter certains calculs. Toutefois cette base est tombée petit à petit en désuétude face aux avantages de simplicité de la base décimale (10) associé au système de position. On en conserve quelques autres traces avec la douzaine (12) par exemple.

Sa conservation pour la mesure du temps semble être un fort ancrage culturel ancien.

Dimensions ou grandeurs

En mesure physique et au travers du SI, toutes les unités sont ramenées aux 7 grandeurs fondamentales et correspondent aux 7 unités de base du SI, soit :

Dimension		Unité du SI		
M	Masse	kilogramme	kg	
L	Longueur	mètre	m	
T	Temps	seconde	s	
I	Courant électrique	ampère	A	
O	Température thermodynamique	kelvin	K	
N	Quantité de matière	mole	mol	
J	Intensité lumineuse	candela	cd	

C'est sur ces 7 unités fondamentales qu'est construit toutes les autres unités et c'est aussi ce qui sert de base à l'analyse dimensionnelle (voir ci-après).

Ainsi l'unité de force, le **newton** (N), est définie comme $1 \text{ N} = 1 \text{ kg.m.s}^{-2}$; ce qui peut s'interpréter en analyse dimensionnel comme $M \cdot L \cdot T^{-2}$, soit une masse multipliée par une longueur divisée par une durée au carré.

Analyse dimensionnelle

C'est une méthode pratique permettant de vérifier l'**homogénéité** d'une formule physique à travers ses *équations aux dimensions*, c'est-à-dire la décomposition des grandeurs physiques qu'elle met en jeu.

L'analyse dimensionnelle repose sur le fait qu'on ne peut comparer ou ajouter que des grandeurs ayant la même dimension ; on peut ajouter une longueur à une autre ; mais on ne peut pas dire qu'une longueur est supérieure, ou inférieure, à une masse. Intuitivement, une loi physique ne saurait changer, hormis dans la valeur numérique de ses constantes, au simple motif qu'on l'exprime dans d'autres unités.

Dans une formule physique, les variables présentes ne sont pas « que » des nombres, mais représentent des grandeurs physiques. Une **grandeur physique** est un paramètre mesurable qui sert à définir un état, un objet. Par exemple, la longueur, la température, l'énergie, la vitesse, la pression, une force (comme le poids), l'inertie (masse), la quantité de matière (nombre de moles)... sont des grandeurs physiques. Une mesure physique exprime la valeur d'une grandeur physique par son rapport avec une grandeur constante de même espèce prise comme unité de mesure de référence (étalon ou unité).

On exprime alors la grandeur par un nombre rationnel multipliant l'unité de mesure. De ce fait, les opérations entre grandeurs physiques ne portent pas que sur les nombres, mais également sur les unités. Ces unités présentes dans les formules physiques contraignent la forme que peuvent prendre ces formules. Ces contraintes sont celles qui font qu'une formule physique est qualifiée d'« homogène » :

- la multiplication (ou la division) est possible entre toutes unités, ou avec des constantes sans dimension, mais c'est pratiquement la seule opération permise sans restriction ; la multiplication ou la division de grandeurs physiques est également possible, et porte à la fois sur les valeurs numériques et sur les unités de ces grandeurs ;
- l'addition (ou la soustraction) de grandeurs physiques de nature différente n'a pas de sens ; l'addition ou la soustraction de grandeurs physiques de même nature est possible à condition de les exprimer avec la même unité ;
- à l'exception de l'élévation à une puissance (une généralisation de la multiplication et de la division), une fonction mathématique (comme le sinus ou l'exponentielle) ne peut porter que sur des nombres « purs », sans dimension. Ce qui est le cas des angles, ça tombe bien.

L'analyse dimensionnelle et le contrôle de l'homogénéité des unités permettent d'éviter des erreurs de calculs et de vérifier certains résultats ; mais aussi de comprendre certaines formules. Ainsi on peut résoudre ou analyser des équations sans les valeurs numériques, juste avec les unités.

Exemples simples :

- 10 mètres + 4 kilogrammes n'a aucun sens, on additionne des grandeurs physiques différentes.
- Une vitesse de 10 m/s, indique bien que l'on parcourt 10 mètres pendant la durée d'1 seconde, on en déduit sans autre connaissance qu'une vitesse c'est une distance (longueur) divisée par une durée.
- 4 kilogrammes + 500 grammes, nécessite d'homogénéiser les unités pour effectuer le calcul, car si ces 2 grandeurs physiques sont les mêmes (masse) elles ne sont pas exprimées dans la même unité. $4 \text{ kg} + 500 \text{ g} = 4 \text{ kg} + 0,5 \text{ kg} = 4,5 \text{ kg}$
- 40 kg divisés par 2 kg, va aboutir à une valeur sans unité (c'est un ratio) :
$$\frac{40 \text{ kg}}{2 \text{ kg}} = 20, \text{ soit } \frac{\text{kg}}{\text{kg}} = 1 \text{ que l'on peut aussi exprimer en pourcentage (\%)}$$
- alors que 40 kg divisés par 2 (sans unité), va rester en kg : $\frac{40 \text{ kg}}{2} = 20 \text{ kg}, \text{ soit } \frac{\text{kg}}{1} = \text{kg}$
- La chute d'un corps de masse 40 kg d'une hauteur de 10 m sur un sol rigide abouti à un choc sur une surface frontale de 10 cm². Ceci peut s'analyser comme suit :

- Conversion en unité SI
 - corps de 40 kg (unité de masse SI)
 - surface frontale de 10 cm² (unité de surface) rapporté à l'unité SI (m²), soit 0,001 m²
 - hauteur de chute de 10 m (unité de longueur SI)
 - gravité sur terre (g=9,81 m.s⁻²)
- Loi de chute libre : $z(t) = -\frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$
 - z(t) est la hauteur (mètres) à l'instant t (secondes)
 - g est la gravité sur le lieu de chute (terre g= 9,81)
 - on peut en déduire par exemple :
 - l'unité de g doit être m/s² pour que la loi soit équilibrée
 - l'équation en unité devient : $m = U_g \cdot s^2$, soit $U_g = \frac{m}{s^2}$
- on a aussi Énergie cinétique : $E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ avec m la masse (kg) et v la vitesse (m.s⁻¹),
l'énergie est donc exprimée en kg.(m.s⁻¹)² ou kg.m².s⁻², ce qui est exactement la définition SI du Newton.

24.1.b. Unités générales

Volume

Symbole : V / Unité : **mètre cube** (m³) / Référence : [wikipédia](https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A8tre_cube)

Le volume est défini comme l'extension d'un objet dans l'espace physique. Le volume s'obtient par la multiplication d'une unité de longueur dans chacune des 3 dimensions de l'espace physique.

Dans notre cas du brassage amateur l'unité de volume de base, plus simple à utiliser, est l'unité dérivée de la capacité : le **litre** (l) qui correspond à 1 dm³. Ou 1 m³ = 1000 litres.

Tableau 28 : Unités de volume (SI)

mm ³	cm ³	dm ³	m ³	dam ³	hm ³	km ³
Millimètre cube	Centimètre cube	Décimètre cube	Mètre cube	Décamètre cube	Hectomètre cube	Kilomètre cube
0,000000001 m ³	0,000001 m ³	0,001 m ³	1	1 000 m ³	1 000 000 m ³	1000 000-000 m ³
	Millilitre (ml)	Litre (l)	1000 Litres (1 kl)			

Les volumes en brassage servent surtout à mesurer les volumes de liquide (moût) ou d'un mélange liquide et solide (maïs) ; mais aussi les contenus des cuves et divers récipients servant au brassage.

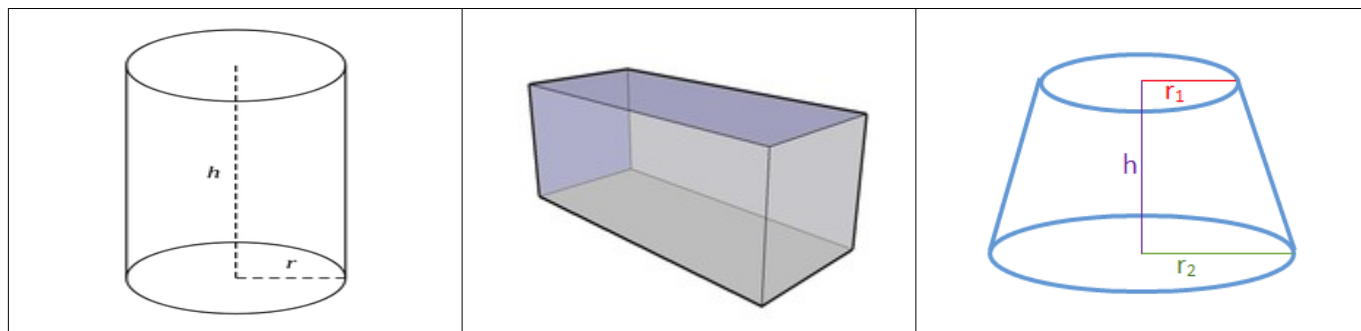
Dans le cas de liquide chaud, il faut tenir compte de la dilatation du liquide qui en augmente le volume, voir le chapitre dédié : Dilatation.

Calcul des volumes

Les cuves qui servent au brassage, que ce soit les seaux plastiques ou glacières de fermentation, ou les différentes cuves de brassage proprement dite sont le plus souvent cylindrique, parfois légèrement conique (ou rectangulaire pour les glacières). Leurs volumes sont simples à calculer.

Pour les calculs, il est plus simple de partir de mesures en dm pour faire les calculs et obtenir ainsi directement des litres, sans conversion.

Volumes		
Cylindre de révolution	Parallélépipède rectangle	Cône tronqué
$V = \pi \cdot r^2 \cdot h$	$V = L \cdot l \cdot h$	$V = \frac{h \cdot \pi}{3} \cdot (R_1^2 + R_2^2 + R_1 \cdot R_2)$



Autres unités de volumes liquides

Le monde Anglo-saxon utilise les mesures sur bases dites impériales mais avec des références différentes rendant le système très complexe. À cela s'ajoute que les Américains différencient les mesures de capacité des liquides et des solides (gallon et dry-gallon, qui n'ont pas la même référence volumique, gasp !).

Tableau 29 : Conversion des unités de volume

Unité US	Dénomination FR	Valeur relative	Correspondance métrique	Correspondances US
Fluid dram (fl dr)		1/1024	3,697 ml	1/8 fl oz
Fluid Ounce (fl oz)	Once liquide	1/128	29,57 ml	1/16 pt
Pint (pt)	Pinte	1/8	0,4732 litre	1/2 qt
Quart (qt)	Quart	1/4	0,9464 litre	1/4 gal
Gallon (gal)	Gallon	1	3,784 litres	231 pouce-cube

Le système anglais utilise les mêmes unités mais avec une référence différente, 1 gallon = 4,5425 litres.

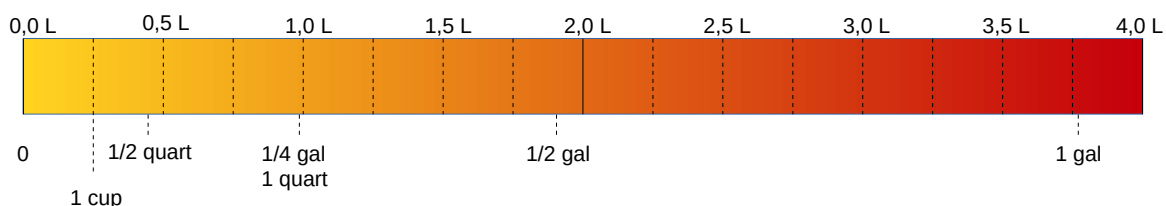


Figure 73: Conversion des volumes liquides : métrique / américain

Volumes en cuisine (ou mesures d'apothicaire)

Comme le monde la cuisine, le monde du brassage utilise certaines sous-unités spécifiques dites mesures d'apothicaire. Là encore malgré des noms similaires les mesures ne sont pas identiques entre l'Europe, l'Angleterre et les États-Unis.

Tableau 30 : Unités apothicaire (volume)

	Valeur Métrique	Valeur unité US	Équivalent US	
Cuillère à café (teaspoon)	5 ml	4,5 ml		
Cuillère à soupe (tablespoon)	15 ml	14 ml	1/2 fl oz	3 teaspoons
Tasse (cup)	250 ml	237 ml	1/2 pint	16 tablespoons

Masse (et poids)

Symbole : M / Unité : **kilogramme** (kg) / Référence : [wikipédia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Kilogramme)

La masse est définie comme une grandeur physique intrinsèque d'un objet qui se manifeste dans un champ gravitationnel. Son statut reste un peu particulier car dans l'usage courant l'unité de base est plutôt le **gramme** (g) alors que l'unité officielle SI est le kilogramme (kg), malgré son nom.

Tableau 31 : Unités de masse (SI)

µg	mg	g	dag	hg	kg	Mg
Microgramme	Milligramme	Gramme	Décagramme	Hectogramme	kilogramme	Mégagramme
0,0000001 g	0,001 g	0,001 kg	0,01 kg	0,1 kg	1,0	1 000 kg
						Tonne

Poids

Le poids est défini comme la masse dans le champ gravitationnel spécifique de la terre ($g=9,81 \text{ N/kg}$), il s'agit donc plutôt d'une force et son unité est le Newton (N). Dans l'usage courant et notamment dans le brassage on confond souvent les deux, ce qui a peu d'incidence tant que l'on brasse sur terre (cas le plus courant).

Autres unités de masse

Le monde Anglo-saxon utilise les mesures issues du système impérial :

- Livre avoirdupois (lb), divisé en 16 onces (oz, ounce) ou 7000 grains (gn, grain)
- 1 lb = 0,45359637 kg

Tableau 32: Conversion des unités de masse système Impérial

Unité US	Dénomination FR de l'unité US	Valeur relative (Pound)	Correspondance métrique	Correspondances US
Grain (gr)		1/7000	0,0648 g	1 gr
Dram (dr)		1/256	1,772 g	1/16 oz
Ounce (oz)	Once	1/16	28,35 g	16 dr
Pound (lb)	Livre	1	453,6 g	16 oz
Ton		2000	907,2 kg	2000 lb

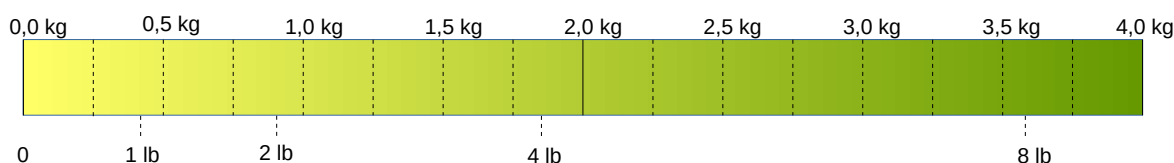


Figure 74: Conversion des masses : métrique / américaine

Température

Symbole : T / Unité : **Kelvin (K)** / Référence : [wikipédia](#)

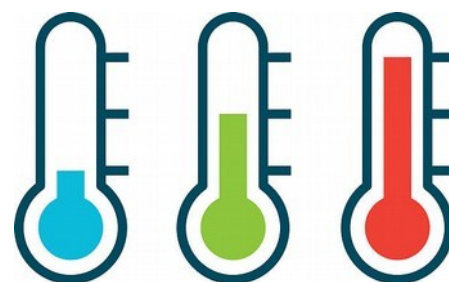
La température est définie comme une grandeur physique qui mesure l'agitation moléculaire. Le Kelvin ([wikipédia](#)) est défini à partir du Zéro Absolu, la température minimale en dessous de laquelle on ne peut pas aller par définition : l'agitation moléculaire étant nulle. Le Kelvin est une mesure absolue de la température et doit son nom à Lord Kelvin (William Thomson).

Pour en savoir plus sur les températures, voir le chapitre

« [Thermodynamique](#) ».

Toutefois cette unité (K) est d'un usage peu courant (à part en thermodynamique où elle est indispensable pour les équations) et l'usage courant est plutôt :

- En Europe : le **degré Celsius** (°C, [wikipédia](#)), mesure de température, définit par Anders Celsius en 1743, utilisé partout dans le monde, intégré au SI comme unité secondaire (simple décalage linéaire par rapport au Kelvin). Elle est définie à partir des températures de changement d'état de l'eau pure. 0 pour le passage du liquide au solide (glace) et 100 pour la température d'ébullition.
- Dans le monde Anglo-saxon : le **degré Fahrenheit** (°F, [wikipédia](#)), mesure de température définit par Gabriel Fahrenheit en 1724, utilisé surtout aux États-Unis. Le point zéro est défini comme le



point de fusion d'un mélange d'eau et de sel et 96 par la température moyenne du corps humain. Plus tard Fahrenheit vérifiera que 32 °F correspond au point de solidification de l'eau et 212 à son point de fusion.

Tableau 33: Unités de température

	Degré Celsius (°C)	Degré Fahrenheit (°F)	Kelvin (K)
Zéro absolu	-273,15 °C	-459,67 °F	0 K
Fusion de la glace	0 °C	+32 °F	+273,15 K
Ébullition de l'eau	+99,98 °C	+212 °F	+373,13 K

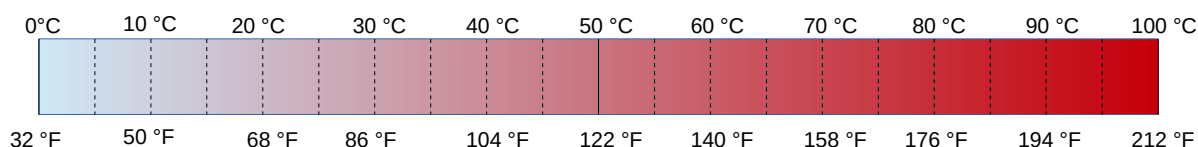


Figure 75: Correspondance température : °C / °F

Le Kelvin est la seule mesure absolue de la température, les autres sont relatives et donc toujours exprimé en degré. Les références de définition sont valables pour de l'eau pure a une pression atmosphérique au niveau de la mer. Ainsi en altitude les points d'ébullition ou de fusion changent (de part la pression atmosphérique).

Conversions

$$^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273,15 \quad \text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273,15 \quad ^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{F} - 32) \times \frac{9}{5} \quad ^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} \times ^{\circ}\text{C} + 32$$

Dans les équations de thermodynamique il faut utiliser exclusivement le Kelvin.

À noter qu'un écart de température $\Delta T = T_1 - T_0$ aura la même valeur en Kelvin ou en °C puisque l'écart entre les 2 unités est un décalage.

Densité et Masse volumique

Densité

Symbole : d / Unité : (aucune) / Référence : [wikipédia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Densit%C3%A9)

La densité est définie comme le rapport entre la masse volumique d'un corps à la masse volumique d'un corps pris comme référence. Pour les liquides ou les solides, le corps de référence est, le plus souvent, l'eau pure à 4 °C. Pour les gaz, la référence est la masse volumique de l'air.

Il s'agit d'une mesure sans unité (rapport entre 2 mesures de même unité).

Référentiel

L'eau pure à 4 °C ayant une masse volumique de 0,999972 kg/m³, la densité d'un liquide est égale à sa masse volumique sous une température de 4 °C uniquement.

Mesure

La densité d'un liquide homogène est mesurée par un densimètre : une ampoule de verre lestée qui flotte dans la solution. Le niveau de flottaison indique la densité relative par une graduation.

Dans le monde du brassage la densité est surtout utilisée pour mesurer le taux de sucre dans le moût. En effet le sucre dissout ayant une densité plus élevée que l'eau, cela « alourdit » l'eau (pour un même volume). C'est une évaluation indirecte de la quantité sucre mais aussi des autres composants.

Masse volumique

Symbole : d / Unité : kg/m³ / Référence : [wikipédia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Masse_volumique)

La masse volumique est définie comme la masse d'un corps rapporté à son volume.

Souvent confondu avec la densité, il s'agit d'une notion différente bien que leur mesure soit équivalente, si la référence de densité est l'eau pure. C'est un peu similaire à la différence entre masse et poids.

De par sa construction l'unité SI kg/m^3 comporte la même valeur dans plusieurs sous-unités.

- $1 \text{ g/cm}^3 = 1 \text{ g/ml} = 1 \text{ kg/l} = 1 \text{ t/m}^3$
- $1 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ g/l}$

La masse volumique d'un objet évolue avec la température, c'est le phénomène de dilatation, voir le chapitre dédié : Dilatation.

Tableau 34: Masse volumique de quelques éléments

Substance	Eau			Éthanol	Sucre (solide)	Sucre (dilué)			air	CO ₂
Température (°C)	4	20	100	20	20	20			20	20
Dilution (g/L)	/			/	/	50	100	200	/	/
Masse volumique (kg/m ³ ou g/L)	1000	998,3	958,13	789,45	1587,9	1018	1037	1075	1,204	1,804

Masse volumique apparente

Pour les matières solides sous forme de granules (particules ou poudre), on distingue 2 masses volumiques. En effet un amas de granules de cette composition comportera des vides (air) entre les particules. Voir illustration ci-contre.

On parle alors de **masse volumique apparente** (plus exactement de masse volumique apparente sans tassement). Alors que la **masse volumique réel** est celle théorique d'un bloc compact de cette matière (sans vide, ni pore).

Cela fait une grande différence avec les grains de céréales par exemple qui de par leur nature sont plus ou moins tassés sous leur forme originelle et occupent un volume supérieur une fois concassés ou réduits en farine, ce peut être contre-intuitif au départ.

Figure 76: Masse volumique apparente

Ainsi par exemple le malt concassé occupe plus de volume que le même malt sous forme de grain. Lors d'un concassage j'ai pu constater une variation de volume entre grains entiers et grains concassés de 1,45. Il faut donc prévoir un seau plus grand pour recevoir la mouture que pour le grain.

	Masse volumique apparente
Orge (grains)	620 kg/m ³
Farine de blé	420 kg/m ³
Orge maltée (grains)	490 kg/m ³
Malt concassé sec	400 kg/m ³
Malt concassé trempé	700 kg/m ³

Autres unités de densité

Historiquement le monde du brassage a utilisé d'autres mesures pour la densité, notamment le degré Plato et le degré Brix. Voir plus bas les Unités spécifiques du brassage.

Pression

Symbole : P / Unité : **pascal** (Pa) / référence : [wikipédia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pascal)

La pression est une grandeur physique qui traduit les échanges de quantité de mouvement dans un système thermodynamique, et notamment au sein d'un solide ou d'un fluide. Elle est définie classiquement comme l'intensité de la force qu'exerce un fluide par unité de surface.

L'analyse dimensionnelle montre que la pression est homogène à une force surfacique ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$) comme à une énergie volumique ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ J/m}^3$).

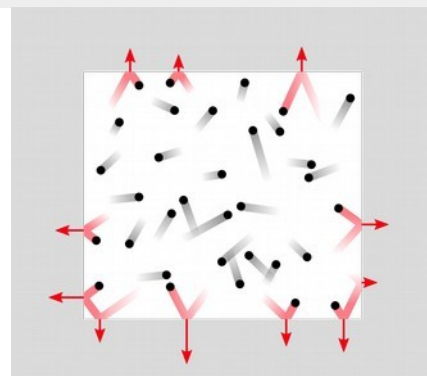


Figure 77: Représentation de la pression. Source : wikipédia.fr

On utilise diverses unités plus usuelles, notamment :

- L'**atmosphère** (atm), définit à 1 comme la pression atmosphérique moyenne sur terre au niveau de la mer à la latitude de Paris ; soit 101 325 Pa ;
- Le **bar** (bar), définit comme 100 000 Pa (1 MPa), assez usuels car donnant des valeurs plus petites et plus facilement manipulable que le Pascal et en même temps assez proche de l'unité atm.
 - Souvent le bar est donné en valeur relative (bar jauge) par rapport à l'atmosphère. Ainsi 0 bar (jauge) ne signifie pas absence de pression (vide) mais pression atmosphérique (1 atm). La pression des pneus des véhicules est ainsi nommé bar, mais c'est bien un bar relatif ou bar jauge. Ainsi le bar est à éviter, notamment pour son ambiguïté entre le bar absolu et le bar relatif.

Tableau 35: Unités de pression

	1 Pa	1 kPa	1 MPa	
	Pascal	kilopascal	mégapascal	
	1 Pa	1 000 Pa	100 000 Pa	101 325 Pa
Bar absolu		0,01	1,0	
Bar relatif				0,0
Atm		0,009869		1 atm
livre/feet ²		20,89		2116
psi		0,145		14,7

Dans le système dit impérial, les pressions se mesurent en livre-force par pouce carré (pound-force par square-foot, psi). 1 psi = 6 894,76 Pa = 0,069 bar = 0,068 atm.

Dans la bière, la pression est en relation directe avec la re-fermentation en bouteille et la pétillance, voir [chapitre dédié](#).

Énergie

Symbole : E / unité : **joule** (J) / Référence : [wikipédia](#)

L'énergie est une mesure de la capacité d'un système à modifier un état, à produire un travail entraînant un mouvement, un rayonnement ou de la chaleur. L'énergie est aussi l'expression d'une puissance pendant une durée.

Dans le SI, le joule est défini comme N·m (soit kg·m²·s⁻²).

Dans un mouvement d'un système de masse m se mouvant à la vitesse v, on a $E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$, c'est l'énergie cinétique.

Dans le brassage on rencontrera surtout l'énergie thermique.

Par exemple : il faut 4185 joules pour augmenter la température de l'eau d'1 degré par exemple.

Unités secondaires

Dans certains domaines des sciences, l'énergie peut être exprimée sous d'autres unités.

- Électron-volt, utilisé en électricité : 1 eV = 1,602.10⁻¹⁹ J
- Calorie, utilisé en diététique : 1 cal = 4,182 J (souvent exprimé en kilo-calorie, 1 kcal = 4 182 J), voir plus bas dans les unités de brassage.
- Kilowatt-heure, utilisé en mécanique pour exprimer l'énergie totale lors d'un phénomène : 1 kWh = 3,6 MJ (3 600 000 J). Attention aux confusions :
 - Ne pas confondre W (**puissance**) et Wh (**énergie**).
Ainsi un appareil qui fournit une puissance de 2 500 W (2,5 kW) ; lorsqu'il fonctionne à régime constant pendant 2 heures fournira une énergie de 5 kWh (5=2,5×2).

- Ne pas confondre Wh (**énergie**) et W/h (**variation de puissance** ou **vitesse**).
Ainsi un appareil qui démarre et monte en puissance pendant 15 minutes (0,25 heure) pour atteindre sa puissance nominale de 10 kW, passera donc de 0 à 10 kW en 0,25 heure
 - soit une variation de 40 kW/h ($40 = \frac{10}{0,25}$).
 - Si la montée en puissance est linéaire, l'énergie fournie aura été de 2,5 MWh ($2,5 = 10 \times 0,25$) qu'il vaudra mieux exprimé en Joule pour éviter les confusions, soit 9 MJ.

En thermodynamique, la chaleur (transfert d'énergie) a pour symbole Q mais se mesure toujours en Joule (J).

Puissance

Symbole : P / unité : **watt** (W) / Référence : [wikipédia](#)

La puissance reflète la vitesse à laquelle un travail est fourni. C'est donc une quantité d'énergie par unité de temps fournie par un système à un autre, un flux d'énergie. De manière générale, lorsque l'énergie

fournie est constante, on a :

$$P = \frac{E}{\Delta t}$$

Dans le SI, les Watt sont définis comme $J \cdot s^{-1}$ ou $kg \cdot m^2 \cdot s^{-3}$.

Puissance et travail

En physique on distingue bien ces 2 notions. La puissance reflète le changement matériel et le temps nécessaire à ce changement, tandis que le travail (notion proche de l'énergie) ne représente que le changement (sans notion de temps).

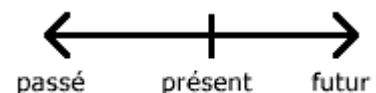
Ainsi lorsque 2 personnes portent une charge équivalente dans un escalier pour la monter au second étage. Le travail fourni sera le même pour les 2 personnes (même masse, même hauteur), quelle que soit la vitesse à laquelle est effectuée l'opération.

Alors que la puissance sera plus importante si la vitesse d'action est plus rapide.

Temps

Symbole : t / Unité : **seconde (s)** / Référence : [wikipédia](#)

Le temps est une notion assez complexe à définir, qui rend compte du changement dans le monde. En science on ne mesure pas réellement le temps, seulement la durée (différence entre 2 moments, 2 temps).



La mesure du temps, dans l'histoire humaine, a toujours été lié aux phénomènes astrologiques (déplacement du soleil, phases de la lune, mouvement du ciel étoilé, retour des saisons...). Ce n'est que récemment que l'humanité (le monde scientifique) c'est totalement affranchi de l'observation astronomique pour définir le temps qui passe.

Le temps est orienté, le temps s'écoule dans un sens (positif), il est impossible de la parcourir en arrière.

- Le moment réel ou instantané est dénommé le présent,
- Les moments avant le temps présent sont le passé,
- Les moments à venir, sont le futur.

Les temps peuvent présenter des aspects cycliques et linéaire :

- Cycle des saisons, cycle du jour et de la nuit...
- Évolution, transformation irréversible, naissance, mort...

L'aspect cyclique du temps par la répétition de phénomènes est fondamentale de la notion de temps-durée et en pose les bases aussi bien pour le temps ressenti (alternance jour/nuit) que par le temps absolu (physique) qui est définies par des cycles très courts de vibration atomique.

Unités de temps

Les unités de mesure du temps ont conservés leurs origines historiques et astrologiques ; elles utilisent un système de base mixte :

- La base 60 (liant secondes, minutes et heures) est d'origine Mésopotamiennes (IIe millénaire avant J.-C.), cette base a la particularité d'avoir beaucoup de diviseurs (2, 3, 5, 6, 9, 10, 12, 15, 20, 30 et 60), ce qui facilite grandement les calculs mentaux.
- La base 12 (liant heure et jour) est d'origine égyptienne (découpage du jour et de la nuit en 12 parts égales chacun, dont l'origine est le découpage du ciel nocturne en 36, puis 12 décans). La base 12 a un lien avec la base 60 ($60 = 12 \cdot 5$).

Tableau 36: Unités temporelles

tierce	seconde	minute	heure	jour	semaine	mois	année
t	s	min	h	d	s	m	a
1/60 s	1	60 s	3 600 s	86 400 s	604 800 s	2 629 743 s en moyenne	31 556 925 s
			60 minutes	24 heures	7 jours	30,4 jours en moyenne	365,24219 jours

Le mois est un découpage un peu particulier, car il est à la fois calé sur la période lunaire (durée entre 2 pleines lunes : 29,53 jours) et divise l'année en 12 parties (30,44 jours). Or l'année comporte un nombre de jours qui n'est pas divisible par 12. Par astuce a été introduit une alternance de durée de 30 et 31 jours a été mise en place avec le mois de février comme rectificateur (28 ou 29 jours les années bissextiles) pour se recalculer sur la durée d'une année.

24.1.c. Unités liées à la chimie

Unités qui seront utilisés dans les [chapitres sur la chimie](#).

Mole

Symbole : mol / unité : **quantité de matière** / Référence : [wikipédia](#)

La mole est une unité de base du SI principalement utilisé en physique et chimie. C'est la quantité de matière d'un système contenant exactement $6,02214076 \times 10^{23}$ entités élémentaires de même type (atomes, ions, molécules...). Ce nombre est appelé Nombre d'Avogadro et correspond à la constante d'Avogadro, notée N_A lorsqu'elle est exprimée en mol^{-1} .

Ce nombre est énorme et difficilement représentable mentalement mais correspond à la réalité des dimensions atomiques. Sa définition par le SI correspond au nombre d'atomes dans 12 grammes de Carbone (^{12}C).

On le compare parfois, pour en prendre mesure, au nombre de maïs soufflés (pop-corn) qui permettrait de recouvrir uniformément le territoire des États-Unis sur une hauteur de 14 km !

C'est une unité de comptage inventé par praticité dans le monde atomique, de même niveau d'une douzaine ou une centaine. Cette unité n'a pas de sens autre que le comptage, elle ne dit rien des dimensions ou masse.

C'est aussi une unité essentielle en chimie, car c'est bien des quantités de matière qui interagissent et pas des masses de matière.

Quantité de matière

Symbole : n / unité : **mol** / Référence : [wikipédia](#)

Dans les conditions habituelles au laboratoire, le nombre d'entités chimiques participant à une réaction est très élevé : pour une masse de l'ordre de la dizaine de grammes de matière, Il se rapproche de 1 000 000 000 000 000 000 000 000, soit 10^{23} .

Les chimistes utilisent communément une unité numérique, la **mole**. La grandeur associée à la mole constitue la quantité de matière.

Une mole de gaz parfait occupe 22,4 L dans les conditions normales de température et de pression (0 °C ou 273,15 K, 101 325 Pa).

La quantité de matière est une notion fondamentale en chimie de base, car ce sont ces grandeurs qui interagissent dans les formules chimiques.

Ainsi la formule simple $\text{Na}^+ + \text{Cl}^- \rightarrow \text{NaCl}$, qui indique simplement que la combinaison d'un ion Na^+ avec un ion Cl^- donne le composé NaCl (sel de table), repose sur les quantités de matière, c'est bien 1 ion Na^+ qui interagit avec 1 ion Cl^- et pas 1 gramme ou tout autre unité.

Masse molaire

Symbole : M / unité : kg.mol^{-1} / Référence : [wikipédia](#)

La **masse molaire** M d'un corps pur moléculaire correspond à la masse d'une mole de molécules de celui-ci. La connaissance de la formule chimique et des masses molaires atomiques permet le calcul de la masse molaire moléculaire.

Acidité (pH)

Symbole : pH / unité : (aucune) / Référence : [wikipédia](#)

Le pH est une mesure de l'acidité d'une solution, c'est le Potentiel d'Hydrogène (pH).

C'est la mesure de l'activité des hydrons (appelés couramment ions hydrogène et noté H^+) en solution aqueuse. Cette mesure est dépendante de la température et souvent la référence est 25 °C.

L'échelle pH n'est pas linéaire mais logarithmique ($\log_{10}$). Une augmentation de 1 pH signifie une concentration 10 fois plus élevée.

Le pH est défini comme $\text{pH} = -\log_{10}[\text{H}^+]$ ou $[\text{H}^+]$ est la concentration en ion hydrogène (mol/L).

Plus la concentration H^+ est forte, plus le pH est faible, plus la solution est acide.

À l'opposé plus la concentration H^+ est faible, plus le pH sera élevé, plus la solution est basique ou alcaline.

Un pH de valeur 7, est celle d'une eau fraîchement distillée, dite neutre et qui contient donc approximativement 10^{-7} moles de $\text{H}^+ / \text{H}_3\text{O}^+$ soit environ $6,12 \cdot 10^{16}$ molécules.

Tableau 37: Exemples de pH

Très acide			Acide			Neutre			Basique Alcalin			Très basique Très alcalin		
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Acide chlorhydrique	Acide de batterie	Acide gastrique	Vinaigre	Vin	Café Bière	Lait	Eau pure	Eau de mer	Savon		Eau de javel	Chaux		Soude

Nota : L'hydrogène étant un atome simple, composé d'un seul proton avec en « orbite » un électron. Devenu ion Hydrogène (H^+) et ayant perdu son seul électron, on le nomme hydron.

Titre

Le titre en chimie est une valeur obtenue par l'opération de titrage et est très lié à l'acidité (pH).

La méthode consiste à ajouter, à la solution à analyser, un composé particulier (souvent acide) petit à petit et à en contrôler l'équilibre chimique. On passe alors par des points d'équivalence, ou se produisent des réactions particulières. La quantité du composé ajouté est alors la valeur du titre.

Le titre de minéralité d'une eau peut s'exprimer en plusieurs unités :

- °fH : degré français, 1 °fH=10 ppm équivalent CaCO_3
- °GH : degré allemand, 1 °GH=17,8 ppm équivalent CaCO_3
- ppm CaCO_3 : parti pour million ou poids par litres en équivalent CaCO_3 (calcaire)

En termes de concentration ionique :

- 50 ppm CaCO_3 = 5 °fH = 2,81 °GH

Le titre est la mesure, le titrage est l'opération.

Le titre est utilisé pour les notions de dureté et d'alcalinité notamment, voir le chapitre « [Introduction à la chimie de l'eau](#) ». Les notions d'acidité et de titre sont développés dans le chapitre « [Chimie des minéraux de l'eau](#) ».

pH et bière

C'est le chimiste danois *Søren Sørensen* qui introduit la notion de pH en 1909. Ce chimiste travaillait alors sur les effets des concentrations de quelques ions sur les protéines lors de la fabrication de la bière, au laboratoire du brasseur *Carlsberg*.

L'unité de mesure d'acidité est donc, historiquement, fortement lié au brassage.

Concentration

Désigne en physique et chimie la proportion d'un soluté dans une solution, on distingue :

- Concentration massique (masse/volume), la plus courante et facile à manier ;
- Concentration molaire (mole/volume), utilisé pour résoudre les équations de réactions chimiques ;
- Concentration équivalente (obsolète).

Concentration massique

Symbole : ρ_i ou $c_m(i)$ / unité : **kg/m³** / Référence : [wikipédia](#)

La concentration massique d'un soluté dans une solution est le rapport de la masse de l'élément i par le volume total de la solution qui contient cet élément.

De manière usuelle souvent exprimé en g/l (volume plus usuel en chimie).

$$1 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ g/l}$$

La somme des concentrations massiques de tous les éléments d'une solution (y compris le solvant) est égal à la masse volumique de la solution, c'est pourquoi on parle parfois de masse volumique partielle.

Unités secondaires

Symbole : ppm / unité : (aucune) / Référence : [wikipédia](#)

Dans les domaines de la chimie notamment on utilise souvent la ppm qui signifie partie pour million, soit le millionième. C'est une fraction des 2 mêmes unités et qui, par définition ; n'a pas d'unité.

$$1 \text{ ppm} = 10^{-6} \text{ de l'unité}$$

Son usage, le plus courant, est pour les concentrations massiques ou on a $1 \text{ ppm} = 10^{-6} \text{ g/kg} = 1 \text{ mg/kg}$

Parfois utilisés pour les concentrations volumiques (on doit symboliser plutôt par ppmv), on a : $1 \text{ ppmv} = 10^{-6} \text{ l/l} = 1 \text{ ml/l}$

Par extension la ppm est souvent utilisée pour exprimer les dilutions en chimie ou il est alors détourné de la définition primitive et devient l'équivalent du mg/l, ce qui est scientifique erroné, car il perd alors son statut de fraction entre 2 même unité et devient une unité à part entière (masse/volume).

Dans le cas de solution aqueuse 1 ppm (1 mg/kg) c'est aussi l'équivalent de 1 mg/l puisque la masse volumique de l'eau pure à 20 °C est 1 g/l. Il s'agit toutefois d'une approximation, car l'eau est rarement pure (surtout s'il s'agit d'une solution) et la température est pas toujours égale à 20 °C.

C'est toutefois cette dernière unité (ppm) qui est la plus utilisée dans les analyses d'eau potable qui nous intéressent.

Concentration molaire (molalité)

Symbole : c_x / unité : **mol/m³** / Référence : [wikipédia](#)

La concentration molaire, aussi appelé anciennement molarité, d'une espèce chimique X est la quantité de matière rapportée au volume total du mélange qui contient cette espèce. Elle est notée c_x , mais aussi $[X]$.

On utilise courant l'unité plus pratique de mol/l, qui correspond a des volumes plus usuel en chimie.

$$1 \text{ mol/l} = 1\,000 \text{ mol/m}^3$$

De part les valeurs numériques gigantesques la quantité de matière s'exprime en mole (voir ci-dessus).

Très utilisé en chimie pour effectuer des calculs sur les équations de réactions chimiques, qui respectent les règles de stœchiométrie (proportion molaire des réactants et produits).

Ne pas confondre avec la concentration massique (voir ci-dessus).

On a $\rho_i = c_i \cdot M_i$ et réciproquement $c_i = \frac{\rho_i}{M_i}$, avec :

- ρ_i : concentration massique de l'élément i (kg/m³ ou g/l)
- c_i : concentration molaire de l'élément i (mol/m³ ou mol/l)
- M_i : masse molaire de l'élément i (g/mol)

Concentration poids équivalent (normalité)

Symbole : N_x / unité : **mEq/l** / Référence : [wikipédia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Normalit%C3%A9)

Il s'agit d'une unité obsolète, mais encore utilisé par simplification notamment pour les réactions acide-base. Son usage est déconseillé par les organismes normalisateurs de la chimie et on doit lui substituer la molalité (concentration molaire, voir ci-dessus). Cette unité est basée sur la notion de poids équivalent obsolète depuis 1869 et la première publication de la table périodique des éléments.

Elle correspond au nombre de mole d'éléments actifs dans un volume d'une solution. Souvent exprimé en mEq/L (milli-équivalent/litre, soit 1/1000 équivalent).

$$C_n = N_n = \frac{n_{eq} \cdot g}{V} = \frac{n_{mol} \cdot \acute{e}q}{V}$$

Dans une réaction acide-base, la normalité correspond au nombre d'ions H⁺ qui seront impliqués. Ainsi l'ion calcium (Ca²⁺) qui va s'associer avec CO₃²⁻ mettra en jeu un partage de 2 électrons et a donc une normalité de 2 pour cette réaction, soit $N = 2 \cdot M$.

La normalité dépend de la réaction chimique qui est étudiée et du contexte, c'est une de ses faiblesses et qui la rend délicate à utiliser et peut conduire à des erreurs. De plus, elle est ambiguë.

Exemples d'ambiguïté :

- Une solution NaCl₂ est considéré avec une normalité de 2 si on s'appuie sur Na (Na²⁺) mais 1 si on s'appuie sur Cl (Cl⁻).
- Une solution CaCO₃ est considéré avec une normalité de 2, car la dissolution de ce sel donne Ca²⁺ et CO₃²⁻ ; encore faut-il connaître la réaction, car la formulation CaCO₃ ne l'indique pas.

Équivalent CaCO₃

Dans l'analyse des concentrations des minéraux de l'eau on transforme souvent les concentrations en « ppm équivalent CaCO₃ ». C'est une convention des métiers de l'eau, qui s'explique par le fait que le CaCO₃ c'est le carbonate de calcite (tartre ou calcaire) qui se dépose dans les canalisations et mérite toute l'attention des gestionnaires de réseau d'eau potable ou des plombiers. Ce calcaire se forme dans des conditions particulières. Une valeur en « ppm équivalent CaCO₃ » est un « potentiel » de CaCO₃ qui ne se réalisera que dans des conditions spécifiques.

Pour passer d'une concentration ppm à ppm équivalent CaCO₃ il faut diviser la concentration ppm par sa masse molaire et multiplier par la masse molaire du CaCO₃ (100 g/mol), soit :

$$V_{\text{ppm CaCO}_3}(a) = \frac{100}{M_a} \times V_{\text{ppm}}(a)$$

l'ion Calcium a une masse molaire de 40 g/mol, on a donc :

$$C_{\text{ppm CaCO}_3}(Ca) = \frac{100}{40} \times C_{\text{ppm}}(Ca) = 2,5 \times C_{\text{ppm}}(Ca)$$



Figure 78: Calcaire / Tartre

24.1.d. Unités spécifiques du brassage

Densités

Historiquement plusieurs unités spécifiques ont été inventées pour mesurer la densité des moûts, notamment la quantité de sucre présent afin de pouvoir estimer ensuite le taux d'éthanol.

Densité

La densité est la mesure de la masse volumique ramenée à une référence (en général l'eau à 4 °C ou 20 °C). L'eau pure a ainsi une densité de 1,0. En savoir plus voir le paragraphe Densité et Masse volumique.

En brassage la densité mesurée est souvent indiquée sous la forme 1,040 ou 1040. Il y a un facteur 1000 entre ces 2 valeurs qui pourtant représentent la même chose. D'un point de vue scientifique seul 1,040 est une vraie densité (valeur sans unité, c'est la masse volumique du liquide divisée par la masse volumique de l'eau pure). 1040 étant plutôt la masse volumique exprimée en unité standard (kg/m³) et 1,040 pouvant aussi être la masse volumique exprimée en g/L.

On utilise les acronymes :

- OG (Original Gravity) ou DI (Densité Initiale) pour exprimer la densité du moût.
- FG (Final Gravity) ou DF (Densité Finale) pour exprimer la densité de la bière verte.

Degré Plato

Le **degré Plato** (°P, [wikipédia](#)) est une grandeur sans dimension permettant d'exprimer le pourcentage d'extrait sec du moût avant fermentation ; unité établie vers 1900 d'après les travaux du *Docteur Fritz Plato*. Encore très utilisé aux États-Unis.

1 °P correspond à 1 gramme de matière sèche, soit environ 1 g de sucre (dans le moût filtré) pour 100 g de moût. C'est aussi un % mais l'on évite cette notation pour ne pas confondre avec le % d'alcool (TAP) et l'on lui préfère le degré Plato (°P).

On peut estimer le degré d'alcool final (en supposant que tout le sucre sera transformé en alcool) en divisant le degré Plato par 3, mais c'est une approximation un peu grossière.

Conversion Plato / masse volumique

$$d = 1 + \frac{p}{258,6 - 0,88 \cdot p} \quad , \text{ et réciproquement } \quad p = \frac{258,6 \cdot (d - 1)}{0,12 + 0,88 \cdot d}$$

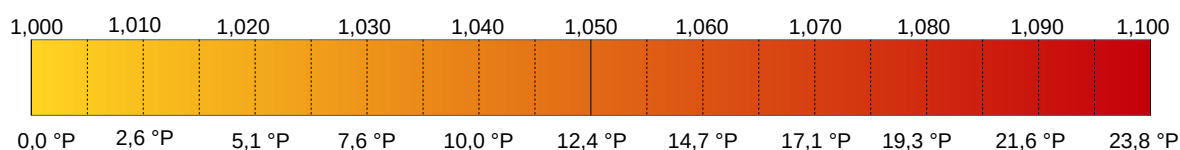


Figure 79: Conversion densité : g/L / °P

Degré Brix

Le **degré Brix** (°B ou °Bx, [wikipédia](#)) ou échelle de *Brix*, mesure la fraction de saccharose dans un liquide. 1 °B équivaut à 1 g de saccharose pour 100 g de solution. 0,96 °B = 1 °P. La mesure est réalisée avec un réfractomètre qui utilise un faisceau de lumière polarisée dont la déviation varie avec la quantité de sucre présent dans la solution et la température.

Correction de densité selon la température

La mesure de densité dans le monde du brassage permet d'estimer le taux de sucre du moût. En comparant cette densité avant (densité initiale, DI ou OG) et après fermentation (densité finale, DF ou FG) on peut en estimer le taux d'alcool. Toutefois ces mesures étant réalisées souvent à des températures différentes, il convient de corriger la mesure, car la densité mesurée varie avec la température. La variation de mesure de densité suivant la température tire son origine de la [dilatation](#) des matériaux (ici l'eau de référence est le liquide mesuré).

Par usage et praticité le plus souvent les densimètres sont calibrés à la température ambiante de 20 °C plutôt que 4 °C (comme le voudrait la physique). Avant d'appliquer une correction il faut connaître la température de calibration de l'appareil de mesure. Ci-dessous une formule de correction pour les températures en degrés centigrades (°C) :

$$D_{réelle} = D_{lue} + \frac{0.00352871 \cdot (T_e - T_c)^2 + 0.225225 \cdot (T_e - T_c)}{1000}$$

Avec :

- D_{lue} : la densité lue sur l'appareil de mesure (ex. 1,041)
- T_c : température de calibration de l'appareil de mesure (souvent 20 °C)
- T_e : température du moût lors de la mesure de densité (°C)

Extrait

L'extrait est une mesure de combien de matière ont été extrait des grains de malt dans le moût. Ce terme se réfère exactement au pourcentage du poids des matières dissoutes dans le moût.

Ainsi si on a 5 g de sucre dissous dans une solution de 100 g, l'extrait de la solution est de 5 %, soit 5 ° Plato.

Cette matière dissoute dans le moût est très difficile à mesurer directement, on peut par contre l'estimer par la densité du moût. Toutefois cette matière dissoute est composée de plusieurs solutés : sucres fermentescible, sucres non fermentescible, protéines et quelques autres éléments.

En 1843 Carl Joseph Napoléon Balling a montré que le moût se comporte globalement comme une solution de sucrose (reste une bonne approximation, quelle que soit sa composition exacte) ce qui lui a permis de définir l'unité Brix (°B). Ses travaux ont été complétés et affinés en 1900 par Dr Fritz Plato qui a abouti à définir l'unité Plato (°P). Ce qui a permis de développer les formules suivantes :

$$E = -668,962 + 1262,45 \cdot D - 776,43 \cdot D^2 + 182,94 \cdot D^3$$

et réciproquement

$$D = 1,0001 + 0,0038661 \cdot E + 1,3488 \cdot 10^{-5} \cdot E^2 + 4,3074 \cdot 10^{-8} \cdot E^3$$

Avec :

- E (°P) l'extrait sec
- D (sans unité) la densité du moût

Il existe toutefois une approximation plutôt efficace et simple :

$$E = \frac{1000 \cdot (D - 1)}{4} \quad \text{soit} \quad E = 250 \cdot (D - 1)$$

On distingue plusieurs extraits (E) :

- OE : c'est l'extrait théorique maximal avant fermentation, calculé à partir de la densité initiale (DI)
- AE : c'est l'extrait apparent après fermentation, calculé à partir de la densité finale (DF), il est dit « apparent » car la solution contenant désormais de l'eau et de l'éthanol qui n'a pas la même densité.
- RE : c'est l'extrait réel, correction de AE pour tenir compte de l'éthanol. Joseph Balling a développé une formule empirique :

$$q = 0,22 + 0,001 \cdot OE \quad \text{et} \quad RE = \frac{(q \cdot OE + AE)}{(1 + q)}$$

Énergie

L'énergie qu'apportera notre bière, lors de sa consommation, est possible à estimer. Généralement ce calcul est fait pour 100 ml ou 1 verre (250 ml, 330 ml ou 0,5 L. Cette énergie est souvent calculée en calorie, une ancienne unité de mesure de l'énergie (1 calorie = 4,184 joules) devenu de nos jours une unité énergétique dans le domaine de la diététique.

Il y a d'abord l'énergie par les sucres résiduels :

- P_v est le poids de la solution (g)

$$C_{\text{sucré}} = \frac{P_v \cdot DF \cdot 3,8 \cdot RE}{100}$$

- 3,8 c'est le facteur calorique par gramme de sucre (kcal/g)

Puis la contribution de l'alcool présent :

$$C_{\text{alcool}} = \frac{P_v \cdot DF \cdot 7,1 \cdot TAP}{100}$$

- 7,1 est le facteur calorique par gramme d'éthanol (kcal/g)

Puis la contribution (faible) des protéines :

$$C_{\text{protéine}} = \frac{P_v \cdot DF \cdot 4,0 \cdot 0,07 \cdot RE}{100}$$

- 4,0 est le facteur calorique par gramme de protéines (kcal/g)
- 0,07 est le pourcentage (7 %) estimée de protéines dans la bière. Selon les études et les bières ce pourcentage varie de 5 à 10 %.

L'énergie totale est la somme de ces 3 composantes, soit :

$$C = C_{\text{sucré}} + C_{\text{alcool}} + C_{\text{protéine}}$$

$$C = \frac{P_v \cdot DF \cdot (3,8 \cdot RE + 7,1 \cdot TAP + 4,0 \cdot 0,07 \cdot RE)}{100}$$

$$C = \frac{P_v \cdot DF \cdot (4,08 \cdot RE + 7,1 \cdot TAP)}{100}$$

On voit ici que le sucre et l'éthanol sont semblable en termes d'énergie (3,8 kcal/g pour le sucre et 3,63 kcal/g pour l'éthanol). Ce qui signifie que par approximation on peut calculer l'énergie de la bière avec la densité initiale uniquement et rendre le calcul bien plus simple :

$$C = \frac{P_v \cdot 239,72 \cdot (DI - 1) \cdot (DI + 3)}{100}$$

Degré d'alcool (TAV & TAP)

Symbole : TAV / Unité : % vol / référence : [wikipédia](https://fr.wikipedia.org/wiki/Degr%C3%A9_d'alcool)

Le degré d'alcool ou Titre Alcoométrique Volumique est la proportion d'alcool dans une boisson (en ratio de volume). C'est le rapport entre le volume d'alcool (éthanol) présent dans le liquide et le volume total à une température de 20 °C. Ce rapport est le plus souvent exprimé en %vol ou degré (°).

On peut aussi l'exprimer en poids ; ce qui donne des valeurs différentes de par les densités respectives de l'alcool et des autres composés de la solution. D'autant que les densités varient avec la température.

- L'eau pure a une masse volumique de 1 000 kg/m³ (ou 1 kg/L)
- L'alcool (éthanol) a une masse volumique de 789,45 kg/m³ (ou 0,78945 kg/L)

En Europe la réglementation réclame un affichage sur les boissons en Volume (TAV ou ABV) alors qu'aux États-Unis le norme est plutôt par poids (ABW ou TAP).

- TAV ou ABV (% vol), mesure le taux d'alcool en ratio de volume
- TAP ou ABW (% mas), mesure le taux d'alcool en ratio de poids (weight), avec

$$ABW = ABV \times 0,78945$$

Estimation du taux d'alcool (TAVP)

Le Titre Alcoométrique Volumique Potentiel (TAVP) est un degré d'alcool calculé à partir des taux de sucres et à partir du facteur de conversion théorique de la fermentation alcoolique par les levures.

Pour les vins le facteur de conversion usuel est de 16,83 g/L. Pour la bière ce taux de conversion est très variable et dépend de la nature des sucres qui dépendent des ingrédients et de l'empâtage. il n'y a pas de facteur usuel unique.

La pratique du brasseur est plutôt de se baser sur l'écart de densité du moût avant (DI, densité initiale) et après fermentation (DF, densité finale), en prenant bien soin d'effectuer les mesures à une température de référence (20 °C) ou d'utiliser une formule de correction pour ramener ces densités mesurées à une température de référence. La différence de densité correspond, peu ou prou, à la transformation des sucres en alcool.

Selon l'équation chimique de la fermentation 1 mole de glucose se transforme en 2 moles d'éthanol et 2 moles de gaz carbonique. Dans la réalité c'est plus complexe, une partie du gaz carbonique va rester dissous dans le moût mais le reste va s'évaporer ; de même une partie de l'éthanol va s'évaporer. Tous les sucres fermentescibles ne sont pas du glucose et surtout cette équation biochimique simplifiée ne correspond pas totalement à la réalité chimique qui est une suite d'étape complexe qui peuvent ne pas se dérouler complètement.

Du coup de nombreuses formules de calculs ont été développées à partir de la théorie mais aussi et surtout de la pratique.

Version-s simple-s

$$TAVP(\%) = f \times (DI - DF)$$
 , avec f valant entre 130 et 132 selon les sources.

La précision du résultat est largement suffisante pour un brasseur amateur, surtout avec la précision obtenue par la lecture du densimètre.

À noter que le gouvernement britannique impose une table de calcul, basé sur cette formule avec des coefficients un peu plus précis. Cette formule sert alors à établir le taux d'alcool de la bière afin de permettre une taxation précise (ça rigole pas chez les Anglais avec la bière). La table propose un coefficient variant de 125 à 135 suivant l'écart entre DI et DF.

Tableau 38: Table des coefficients de conversion TAV selon l'écart de densité

ΔD (min/max)	0,000 0,069	0,070 0,104	0,105 0,172	0,173 0,261	0,262 0,360	0,361 0,465	0,466 0,571	0,572 0,679	0,680 0,788	0,789 0,897	0,898 1,007
f	0,125	0,126	0,127	0,128	0,129	0,130	0,131	0,132	0,133	0,134	0,135
TAVP (min/max)	0,0 0,8	0,8 1,3	1,4 2,1	2,2 3,3	3,3 4,6	4,6 6,0	6,0 7,5	7,5 9,0	9,0 10,5	10,5 12,0	12,0 13,6

Source : [Excise notice 226 : Beer duty / calculation-strength](#)

Version théorique

Karl Balling (Institut Polytechnique de Prague, 1843) met au point un densimètre plus précis que les précédents accompagnés d'une table de conversion et d'une unité de mesure : le degré Balling. La mesure avec ce densimètre permet de calculer l'atténuation réelle et le degré alcoolique attendu.

Ces travaux seront complétés et améliorés par Adolf Brix (1897), puis Fritz Plato (1900) qui créeront eux aussi leur propre unité de mesure : degré Brix et degré Plato.

Cette équation se traduit de nos jours (en unité standardisée de densité) en :

$$\text{Taux d'alcool par masse : } A \%_{\text{masse}} = \frac{76,08 \times (DI - DF)}{1,775 - DI}$$

$$\text{Qu'il faut convertir en TAV (Taux d'alcool en volume via : } A \%_{\text{vol}} = A \%_{\text{masse}} \times \left(\frac{DI}{0,78945} \right)$$

$$\text{Ce qui donne la formule complète : } A \%_{\text{vol}}(TAV) = \frac{76,08 \times (DI - DF)}{1,775 - DI} \times \left(\frac{DI}{0,78945} \right)$$

Version plus précise mais plus complexe

De nos jours, il a été vérifié que l'équation de Balling présente une légère surestimation surtout pour les taux d'éthanol important. Des travaux plus récents ont produit d'autres équations comme ceux de Cutaia,

Reid et Speers (« *Examination of the relationship between Original, Real and Apparent Extracts and Alcohol in pilot plant and commercially produced Beers* », J. Inst. Brew, 115(4), 318-327, 2009).

$$A \%_{\text{masse}} = 0,372 + 0,00357 \times (EI - EF)$$

Avec : $EI = -616,868 + 1111,14 \times DI - 630,272 \times DI^2 + 135,997 \times DI^3$
 et $EF = -616,868 + 1111,14 \times DF - 630,272 \times DF^2 + 135,997 \times DF^3$

Densité initiale théorique (DIT)

Le brasseur peut calculer la densité théorique de sa maische avant ébullition. Ceci permet au brasseur d'anticiper le résultat et de préparer sa recette en conséquence pour s'approcher du style de bière désiré. Cette évaluation se fait en effectuant la somme des potentiels de densité pour chaque type de grains, pondéré par leur masse dans la recette et associé à un coefficient de rendement spécifique à l'installation du brasseur.

$$D_{\text{théorique}} = 1 + \frac{\sum m_i \cdot p_i \cdot \left(\frac{f \cdot n \cdot \frac{1}{V}}{1000} \right)}{1000} \quad \text{avec}$$

n (%) : rendement de l'installation (variant généralement de 60 à 80 % en brassage amateur)

V (L) : volume de la maische

m_i (kg) : masse du grain i

f : apport du sucre par point de densité : 383,0 **PKL**

p_i (%) : potentiel de densité du grain i (part de sucre)

La densité post-ébullition est calculable à partir de la même formule en remplaçant V par le volume post-ébullition refroidi. Les volumes mesurés doivent être mesurés à température ambiante afin de ne pas tenir compte de la dilatation, c'est la correction de densité.

Le coefficient n correspond au rendement de l'installation et est très dépendant des détails du process mis en œuvre. Généralement les brasseurs amateurs constatent des rendements de l'ordre de 70 à 75 %. Il est dépendant de la cuve, du type de chauffe, du type de filtrage, etc.

Le brasseur amateur peut avoir une estimation de son rendement en comparant la densité théorique maximale (calculé avec un rendement (n) de 100 %) et le rendement réel obtenu (mesure de la densité après refroidissement).

Tableau 39: Potentiel théorique maximal des malts

Potentiel des grains (p en %)			
Malts de base : 80 %	Malts caramel / cristal : 75 %	Malts chocolat : 0 %	Malts black : 0 %
Malts de blé : 80 %	Malt de seigle : 72 %	Flocons riz ou orge : 70 %	Flocons avoine : 80 %
Sucre blanc : 100 %			

Le brasseur amateur peut s'affranchir de ces calculs en utilisant des logiciels de brassage disponible.

Pouvoir diastasique

Symbole : WK / Unité : **degré Windisch-Kolbach** (°WK) / Référence : [wiki brasseur amateur](#)

Le pouvoir diastasique (ou pouvoir enzymatique ou « *diastic power* ») c'est le potentiel des enzymes, présents dans un malt, à convertir potentiellement de l'amidon en sucres simples.

Cet indice caractérise le potentiel d'hydrolyse des chaînes de glucoses de l'amidon, dans les conditions adéquates.

La mesure est généralement réalisée par le malteur et exprimée en :

- Degré **Windisch-Kolbach** (°WK) plutôt en Europe et définit comme : la quantité de maltose produite par 100 g de malt en 30 minutes à 20 °C.
- Degré **Lintner** (°L) surtout aux États-Unis. Définis comme : 100 °L c'est 0,1 cc d'une infusion à 5 % de malts qui agit sur 100 cc d'une infusion à 2 % d'amidon pendant 1 heure à une température de 20 °C et qui produit suffisamment de sucre pour faire complètement réagir une solution de Fehling de 5 cc. ;
- On passe de l'un à l'autre :

$$WK \approx 3,5 \cdot Lintner - 16 \quad Lintner \approx \frac{WK + 16}{3,5}$$

Le pouvoir diastique dépend de la céréale et du procédé de maltage.

Une céréale crue à un pouvoir diastique nul ; une céréale très torréfiée aura aussi un pouvoir diastique nul. Seuls les malts dits de base ont un pouvoir diastique important.

Pouvoir diastasique de la maische

La transformation en sucres simples de la totalité de l'amidon présent dans la maische, nécessite une quantité suffisante d'enzymes. Plus un malt a une couleur foncée, plus il aura été cuit, moins son pouvoir enzymatique sera fort. Une céréale crue (non maltée) à un pouvoir enzymatique quasi nul, car il ne contient quasiment aucune enzyme (c'est la germination du grain qui provoque l'apparition des enzymes nécessaire à l'hydrolyse de l'amidon).

Pour que la maische puisse devenir un moût viable, il faut un pouvoir enzymatique total suffisamment important. Ce pouvoir enzymatique sera la moyenne des pouvoirs enzymatique des céréales composant la maische, pondérée par leur poids respectif.

Une maische nécessite un **pouvoir diastique total minimum de 100 à 120 WK** (35-40 °L) pour pouvoir s'auto-converter sur une durée approximative de 60 minutes.

Plus le pouvoir enzymatique sera élevé plus rapide sera la transformation (empâtage). Plus il sera faible plus il faudra prolonger le palier de saccharification.

Tableau 40: Pouvoir diastique des malts

Malts	° Lintner	WK	Malts	° Lintner	WK
Pale Ale américain à 2 rangs	140	470	Vienna	50 à 60	160 à 200
Pale Ale américain à 6 rangs	160	550	Froment malté	60 à 90	200 à 300
Pale anglais	40 à 70	120 à 230	Seigle malté (rye)	105	350
Pale Marris Otter	120 à 140	400 à 470			
Pale belge (2 rangs)	60 à 80	200 à 260	Céréales non maltées	0	
Pilsner allemand	110 à 140	370 à 470	Crystal malt	0	
Munich 10 SRM	40 à 70	120 à 230	Chocolate malt	0	
Munich 20 SRM	25 à 30	70 à 90	Black malt	0	

Le pouvoir diastique de la maische est la somme des pouvoirs diastique des différentes céréales qui compose la maische proportionnellement à leur masse, soit :

$$DP_{total} = \frac{\sum_i (DP_i \times M_i)}{\sum_i M_i}$$

Exemple de calcul pour estimer le pouvoir diastique d'une recette.

Malts	Masse (kg)	WK	M . WK
Pale Ale à 2 rangs	1,5	470	705
Munich 20 SRM	0,5	80	40
Froment cru	1,0	0	0

Riz	0,8	0	0
Pain rassi en croûtons	0,5	0	0
Total	5,0		745
Total pondéré (WK total)			155,2

Avec un pouvoir diastique de 155 WK la maische sera autosuffisante mais un peu faible, il sera plus prudent de prolonger un peu l'empâtage pour exploiter le plein potentiel de l'amidon.

Voir plus de détails dans le chapitre [maltage](#).

Amertume (AAU et IBU)

Référence : [wikipédia](#)

On distingue plusieurs notions liées à l'amertume en brassage.

Comme l'amertume provient essentiellement des acides alpha contenu dans le houblon on a :

- Le taux d'acide alpha d'un houblon est généralement indiqué sur les sachets par le fabricant et dépend des lots. **AAU** (%), mesure le taux d'acide alpha, c'est l'amertume potentielle du houblon brut.
- La quantité d'acide alpha réellement présente dans le moût dépend des houblons et quantités utilisés mais aussi du process. **IBU** (mg/L), mesure la quantité d'acide Alpha isomérisé par litre, utilisé définir l'amertume d'une bière.
- Certains parlent aussi d'amertume relative, car la perception de l'amertume est lié en partie à la couleur de la bière. Les bières foncées supportent mieux des amertumes fortes.

La méthode moderne de mesure de l'IBU consiste à prélever un échantillon de bière, d'y ajouter des solvants et des acides afin d'extraire les acides alpha. Le mélange est centrifugé et soumis à un éclairage précis (275 nm) puis analysé par chromatographie. La quantité de lumière absorbée est comparée à un mélange ne contenant que les solvants. La différence entre les 2 échantillons permet de déterminer l'IBU.

Cette valeur reflète la concentration mesurée par une analyse chromatique sous haute pression des taux d'acide alpha des houblons isomérisés dans la bière.

- La valeur est le plus souvent comprise entre 0 et 100.
- Certaines bières très amères peuvent monter jusqu'à 120.

Toutefois ce n'est pas la réalité de l'amertume ressentie lors de la dégustation mais plutôt une mesure objective de la concentration en certains composés amers du houblon. Le ressenti de l'amertume à la dégustation dépend de beaucoup d'éléments. L'IBU est la base mais qui sera balancé par les sucres résiduels notamment, la composition de l'eau, la température et le palais du goûteur.

À cela s'ajoute que d'autres composés peuvent apporter de l'amertume, mais dans une bière classique (aromatisée aux houblons) c'est l'acide alpha et bêta qui apporte l'essentiel de l'amertume.

Estimer l'IBU pour préparer sa recette :
$$IBU = H \times \frac{(AAU + \frac{AAB}{9})}{0,3}$$
, avec :

- H : concentration des houblons (grammes / litre)
- AAU : concentration des houblons en acide alpha (%)
- AAB : concentration des houblons en acide beta (%)

Voir plus de détails dans les chapitres « [Cuisson -Aromatisation du moût](#) » et « [Dégiustation-Goût](#) ».

Couleurs (bière et grains)

Référence : [wikipédia](#)

Les couleurs sont la perception par notre œil (et analysé par notre cerveau) de la répartition spectrale. Aucune mesure ne peut refléter ce phénomène, car il s'agit en réalité d'une information créée par notre cerveau à partir d'un ensemble de capteurs situés dans notre œil, le tout restant assez subjectif.

L’approche scientifique générale est souvent physique, et confond couleur perçue et spectre lumineux, c’est une approximation qui ne tient pas compte de l’interprétation de notre cerveau et des limites de nos capteurs (yeux).

La lumière est composée d’un faisceau d’ondes électromagnétiques ayant un spectre, une répartition par longueur d’onde. Le spectre lumineux visible varie du violet profond au rouge profond (figure 80).

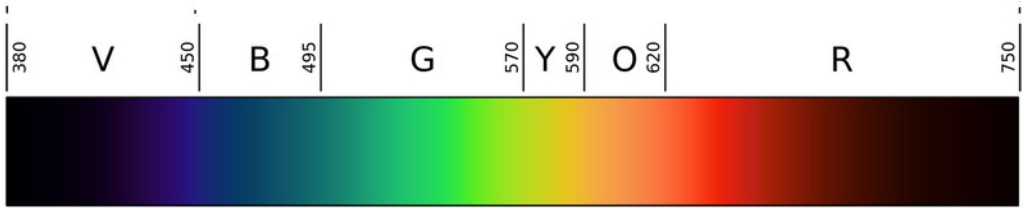


Figure 80: Spectre de la lumière visible (nm)

Couleur de la bière et des grains

Les couleurs qui nous intéressent en général dans le brassage sont les couleurs des grains et de la bière, soit les couleurs entre les jaunes très clairs et les oranges sombres, voir très sombres (noirs) : voir figure 81. Pour définir et mesurer ces couleurs de la bière, il a été développé plusieurs systèmes.

- **EBC**, mesure de la couleur en Europe, développé en 1946 par “*European Brewing Convention*”, utilisé pour la couleur de la bière.
- **SRM**, mesure de la couleur aux États-Unis, développé en 1950 par “*American Society of Brewing Chemists*”, utilisé pour la couleur de la bière.
- **Lovibond** (°L), mesure de la couleur aux États-Unis, développé en 1860 par James Lovibond, utilisé surtout pour la couleur des grains.

$SRM = 0,508 \cdot EBC$		$EBC = 1,97 \cdot SRM$		$Lovibond = \frac{(EBC + 1,2)}{2,65}$		$EBC = (Lovibond \cdot 2,65) - 1,2$	
Jaune clair		2 SRM	4 EBC	2,0 °L			
Jaune paille		3 SRM	6 EBC	2,7 °L			
Or		4 SRM	8 EBC	3,4 °L			
Or profond		6 SRM	12 EBC	4,9 °L			
Ambré clair		9 SRM	18 EBC	7,1 °L			
Ambré		12 SRM	24 EBC	9,4 °L			
Ambré profond		15 SRM	30 EBC	11,6 °L			
Brun		20 SRM	40 EBC	15,3 °L			
Marron profond		30 SRM	60 EBC	22,8 °L			
Noir		40 SRM	80 EBC	30,2 °L			

Figure 81: Conversion couleur : EBC / SRM / Lovibond

Modélisation numérique

On peut approximer les couleurs de bière par des équations permettant de les représenter dans un espace colorimétrique RVB (RGB en anglais). Il s’agit du modèle numérique des écrans d’ordinateur, représentant 3 composantes (Rouge, Vert et Bleu) dont les valeurs varient de 0 à 255.

Bien sur cela reste une grosse approximation, il faut se rappeler que les modèles de couleurs RGB (écran) est un espace soustractif alors que la représentation des couleurs réelles est plutôt additif. Et surtout la

couleur de la bière (SRM et EBC) nécessite pour être comparé d'être dans un environnement stable et bien défini (épaisseur de bière, éclairage...).

Toutefois pour une représentation numérique c'est bien souvent suffisant. La figure ci-dessus est construite sur ce modèle.

$$R = 255 - EBC^{1,3} \quad V = -4,25 \cdot EBC + 255 \quad B = \frac{255}{0,3 \cdot EBC + 1}$$

La Figure 81 est construite avec ce modèle de couleur.

Plus de détails sur la vision humaine dans le chapitre « [Dégustation-Vision](#) ».

Beer Enjoyment

En 2012, la société MindLab a fait le buzz dans la presse britannique en divulguant une nouvelle unité, le « Beer enjoyment index (BEI) », qui permet de mesurer (précisément) le plaisir que prend le consommateur à boire sa bière. Cette mesure a été établie à partir d'une étude portant sur 1000 volontaires et financé par Tayler Walker (une chaîne de pub anglais).capture

L'index E s'exprime ainsi :

$$E = -(0,62 \cdot T^2 + 39,2 \cdot W^2 + 62,4 \cdot P^2) + (21,8 \cdot T + 184,4 \cdot W + 395,4 \cdot P + 94,5 \cdot M - 90,25 \cdot V) + 50 \cdot (S + F + 6,4)$$

- E c'est le facteur qui décrit le plaisir du consommateur ;
- T, la température ambiante (°C) ;
- W, le nombre de jours avant de retourner au travail ;
- P, le nombre de personne avec qui on boit,
- M, représente l'humeur du consommateur
- V, représente le volume de la musique du pub

S et F, représente la présence d'amuse-bouche (S) et de nourriture (F)

24.2. Gérer les volumes

En brassage amateur ou professionnel, on peut faire face à des soucis logistiques lors du brassage, notamment avec le matériel disponible. C'est pourquoi, notamment, le brasseur doit bien préparer sa recette et les volumes qui seront à gérer au cours du brassage.

24.2.a. Gérer les transferts

Il s'agit là d'un simple problème logistique. En brassage amateur il va falloir transférer plusieurs fois son mout ou la bière d'une cuve à l'autre. On peut s'aider de pompe, mais là on aborde des méthodes qui se rapprochent plus du professionnel que de l'amateur qui fera souvent plutôt tout à la main et devra porter des cuves de plusieurs dizaines de kilos.

Pour réaliser tout ceci sans trop d'efforts, il faut se préparer et minimiser les efforts. Si les volumes tempérés sont transférables manuellement il en est autrement des volumes chauds, notamment après ébullition. Car un poids élevé associé à une température élevée va vite se révéler dangereux.

Pour le poids, l'astuce la meilleure reste probablement d'utiliser la gravité pour permettre les transferts.

Pour les moins équipés il faut aussi penser au siphon qui est formidable outils de transfert pour les températures moyennes (un siphon plastique n'aime pas le chaud).

24.2.b. Gérer le volume

Un brassage traditionnel amateur utilisera plusieurs cuves, généralement 3 ou 4, chacune ayant du volume (avec une marge de sécurité) :

- Cuve d'empâtage
- Cuve de filtrage, qui peut être la même que pour l'empâtage
- Cuve d'eau de rinçage
- Cuve de cuisson, qui peut être la même que la cuve d'empâtage (après nettoyage)
- Cuve de fermentation
- Cuve de transfert avant embouteillage, qui peut être la cuve d'empâtage

Calculer le volume des cuves

Illustration cylindre

Les cuves sont le plus souvent des cylindres, dont le volume est simple à calculer (voir l'annexe Calcul des volumes). Pour se simplifier la tâche est obtenir directement des litres il est conseillé de faire les mesures en décimètres (dm), le volume de vos cuves est alors $V = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot h$ avec d le diamètre intérieur de la cuve et h sa hauteur intérieure.

Prenez ensuite un coefficient de sécurité de 10 % (une cuve remplie à ras bord est pas gérable). Soit un coefficient de sécurité $C_{\text{sécurité}} = 0,9$.

Il faudra aussi tenir compte de la dilatation (voir chapitre détaillé ad-hoc : 17.11), notamment pour la cuve de cuisson (le moût est porté à ébullition, soit 100 °C), mais aussi pour la cuve d'empâtage (température de fin environ 74 °C). La cuve de fermentation ne subira aucune température élevée, les phénomènes de dilatation/contraction n'ont aucune incidence.

On sait que la dilatation moyenne sera d'environ 4,12 % du volume, soit un coefficient $C_{\text{dilatation}} = 0,0412$ par litre.

Soit au final un volume « réel » de cuve à prendre en compte de :

$$V_{\text{réel}} = V \cdot (1 - C_{\text{dilatation}}) \cdot C_{\text{sécurité}}, \text{ soit } V_{\text{réel}} = V \cdot (1 - 0,0412) \cdot 0,9, \text{ soit environ } V_{\text{réel}} \approx 0,86 \cdot V_{\text{théorique}}$$

Calculer les volumes morts des cuves

Illustration fond de cylindre

Suivant les cuves, les étapes et les procédés il y a des volumes perdus en fond de cuve, on les appelle les « volumes morts » ou « pertes de transfert ».

C'est le cas des cuves où l'écoulement se fait avec un robinet ou des cuves automatiques ou encore des volumes que brasseur laisse volontairement au fond de la cuve pour pas trop transférer les résidus de fond de cuve.

On peut les mesurer avec la formule de calcul des cylindres en prenant comme hauteur le fond de cuve justement.

On les retrouve à chaque étape de transfert, soit

- $V_{\text{perte-empâtage}}$ (L), souvent quasi nul sauf dans les cuves qui font aussi filtre, ces alors une perte de filtration
- $V_{\text{perte-filtrage}}$ (L), souvent 1 à 2 cm sur les systèmes de filtration maison, mais parfois jusqu'à 5 cm sur les systèmes automatiques
- $V_{\text{perte-cuisson}}$ (L), de 1 à 3 litres suivant le système, ce sont les résidus (agglomérats de protéines par exemple) On doit y intégrer les pertes qui restent dans les houblons qui sont retirés avant fermentation.
- $V_{\text{perte-fermentation}}$ (L) : il s'agit de la lie (sédimentation des levures mortes) additionnée des résidus de houblons et parfois des protéines. Un ensemble de résidus que l'on ne souhaite pas transférer dans la cuve d'embouteillage.
- $V_{\text{perte-embouteillage}}$ (L) : le fond de cuve que l'on ne peut siphonner.

Évolution du volume au cours du brassage

Tout au long du brassage, le volume à gérer va évoluer. Principalement par ajout d'eau, rejet des déchets (drêche), pertes (fond de cuve), activité enzymatique, etc.

Empâtage

L'eau d'empâtage dépend de la recette : quantité de grain et ratio eau/grain choisit.

Soit :

- M_{grain} (kg) : Masse des grains
- R (L/kg) : Ratio d'empâtage, souvent compris entre 2,6 et 4,0, et la plupart du temps 3,0 L/kg
- d_{grain} (g/L) : Masse volumique du grain, de l'ordre de 0,7 kg/L
- $T_{\text{enzymatique}}$ (L/kg) : Volume d'eau consommé par l'activité enzymatique, de l'ordre de 0,05 de grain

On a alors le volume d'eau d'empâtage : $V_{\text{eau-empâtage}} = M_{\text{grain}} \cdot R$

Et le volume total dans la cuve, en début d'empâtage, sera le volume d'eau empâtage, additionné du volume des grains secs, soit :

$$V_{\text{empâtage}} = V_{\text{eau-empâtage}} + \frac{M_{\text{grain}}}{d_{\text{grain}}}, \text{ soit : } V_{\text{empâtage}} = M_{\text{grain}} \cdot \left(R + \frac{1}{d_{\text{grain}}} \right)$$

Lors de l'empâtage, de l'eau va légèrement s'évaporer, mais comme on reste bien en dessous de la température d'ébullition, ce volume est négligeable. Le travail des enzymes va aussi consommer de l'eau puisque chaque réaction enzymatique qui hydrolyse l'amidon consomme une molécule d'eau ; ce taux est estimé à 50 mL/kg de grains. Un brassin standard avec 5 kg de grains occasionne une petite perte de 0,25 L.

$$V_{\text{fin-empâtage}} = V_{\text{empâtage}} \cdot (1 - M_{\text{grain}} \cdot T_{\text{enzymatique}})$$

Filtrage

En fin de filtration, le volume sera celui de la fin d'empâtage additionné de l'eau de rinçage ajoutée, minoré de l'eau qui reste piégé (dans la drêche mais aussi dans l'espace mort du système de filtration), soit :

- $V_{\text{rinçage}}$ (L) : l'eau de rinçage déterminée par la recette et l'objectif de volume du brasseur
- $T_{\text{absorbé}}$ (L/kg) : Volume absorbé par le grain, compris entre 0,6 à 1,0 (soit 0,8 en moyenne)
- $V_{\text{absorbé}}$ (L) : le volume absorbé par les grains qui reste dans les drêches
- $V_{\text{perte-empâtage}}$ (L) : le volume perdu dans le fond de filtre suivant le système utilisé

On a alors :

$$V_{\text{pré-ébullition}} = V_{\text{fin-empatage}} + V_{\text{rinçage}} - V_{\text{absorbé}} - V_{\text{perte-empatage}} - V_{\text{perte-filtrage}}$$

Cuisson (ébullition et aromatisation)

Pendant la cuisson va se produire un phénomène d'évaporation important (c'est un des objectifs de cette opération). L'évaporation est souvent considérée en amateur comme comprise entre 8 et 15 %/heure de cuisson. Cette évaporation va se produire surtout pendant l'ébullition et dépend de la manière dont on couvre la cuve.

Un autre phénomène va se produire : la dilatation du moût, dont le volume va augmenter temporairement ; c'est pourquoi il faut en tenir compte dans le calcul du volume max de cette étape. Cette dilatation (volume apparent) est d'environ 4 % (voir plus haut). Dans le calcul du volume final on n'en tient pas compte, car cette dilatation est temporaire et sera suivie d'une réduction lors du refroidissement. Il faut bien différencier le volume max et le volume final qui lui est calculé à température ambiante.

Lors du transfert en cuve de fermentation on aura les pertes dues au dépôt que l'on ne souhaite pas transférer ainsi qu'on moût qui restera piéger dans les aromates qui vont être retiré.

Soit :

- $T_{\text{évaporation}}$ (%/h) : le pourcentage d'évaporation par heure d'ébullition
- $D_{\text{ébullition}}$ (h) : la durée d'ébullition

On a alors :

$$V_{\text{pré-fermentation}} = V_{\text{pré-ébullition}} \cdot (1 - (T_{\text{évaporation}} \cdot D_{\text{ébullition}})) - V_{\text{perte-cuisson}}$$

Fermentation

Soutirage (mise en bouteille)

24.2.c. Optimiser son brassin

On cherchera à obtenir le volume de bière le plus optimal par rapport aux contraintes précédentes. Il faut alors calculer et estimer le volume maximal possible avec les cuves utilisées et le procédé de brassage employé.

Coté volume et selon la recette, les éléments contraignants seront le volume maximal de la cuve de cuisson et le volume de la cuve de fermentation.

Exemple :

J'utilise une cuve d'empatage et d'ébullition dont les dimensions sont :

un diamètre interne de 40,5 cm, soit $d=4,05$ dm et une hauteur interne de 39 cm, soit $h=3,9$ dm (prendre les dm comme unité de longueur, permet d'obtenir un résultat directement en litre).

Le volume théorique $V_{\text{théorique}} = \pi \cdot h \cdot \frac{d^2}{4} = \pi \cdot 3,9 \cdot \frac{4,05^2}{4}$, soit $V_{\text{théorique}} = 50,24$ litres

Le volume réel à prendre en compte (sécurité vis-à-vis de la dilatation lors de la cuisson) est de $V_{\text{réel}} = 0,86 \cdot V_{\text{théorique}}$, soit $V_{\text{réel}} = 0,86 \cdot 50,24$, soit $V_{\text{réel}} = 43$ litres.

On ne pourra donc bouillir qu'un maximum de 43 litres de moût chaud (Volume post-ébullition, après refroidissement).

On peut ensuite en déduire les volumes d'eau nécessaires et le volume de bière final.

A continuer

24.3. Propriétés physico-chimiques

Composé (lien Wikipédia)	Formule brute	État ordinaire (20 °C, 1 atm)	Masse volumique (25 °C)	Température de fusion (1 atm)	Température d'ébullition (1 atm)	Masse molaire	Capacité thermique massique (20 °C)	Conduction thermique	Pression de vapeur saturante (20 °C)	Solubilité dans l'eau (20 °C)
			kg/m ³	°C	°C	g/mol	J/kg/K	W/K/m	KPa	g/L
Eau	H ₂ O	Liquide	997	0	100	18,02	4850	0,565	2,34	n/a
Éthanol	C ₂ H ₆ O	Liquide	789	– 114	79	46,07	2460		5,8	miscible
Moût		Solution	1050		100		3860			
Calcium	Ca ²⁺	Solide	1540	842	1484	40,08	632	201	n/a	
Magnésium	Mg	Solide	1738	650	1090	24,31	1825	156	n/a	
Bicarbonate	HCO ₃ ⁻	Sel				61,02			n/a	
Phosphate	PO ₄ ³⁻	Sel				94,97			n/a	
Sulfate	SO ₄ ²⁻	Sel							n/a	
Sodium	Na ⁺	Solide	968	97,8	883	22,99	1230	141	n/a	
Potassium	K	Solide	890	63,5	759	39,10	757	102,4	n/a	
Chlorure	Cl ⁻	Sel							n/a	
Glucose	C ₆ H ₁₂ O ₆	Solide	1544	146		180,16			n/a	900
Saccharose sucre de table	C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁	Solide	1588	185,5	n-a	342,30			n/a	2000
Chlorure de sodium sel de table	NaCl	Solide	2,17	801	1465	58,44			n/a	358
Air (sec)		Gazeux					1005			
Air		Gazeux	1,2	– 216	-194	28,97	1030	0,0262		29,2
Dioxyde de carbone	CO ₂	Gazeux	1,87	– 78,5	-56,6	44,01			5720	1,7
Inox (alimentaire 316L)		Solide	8,0	1380			502	17	n/a	n/a

24.4. Constantes

Avogadro

https://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre_d%27Avogadro

$$N_A = 6,022\,140\,76 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

C'est le nombre d'entités que se trouve une mole de matière.

Boltzman

https://fr.wikipedia.org/wiki/Constante_de_Boltzmann

$$k_B = 1,380\,649 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$

Gaz parfaits

https://fr.wikipedia.org/wiki/Constante_universelle_des_gaz_parfaits

$$R = 8,314\,462\,618\,153\,24 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

On obtient R avec $R = \frac{R_x}{M_x}$, on a aussi $R = N_A \cdot k_B$

R_x la constante spécifique du gaz

M la masse molaire du gaz.

24.5. Index des figures et tableaux

Index des figures et illustrations

Figure 1 : Schématisation du brassage selon les ingrédients et composants...	5
Figure 2 : Différents malts...	9
Figure 3: Cellule de l'endosperme contenant les granules d'amidon...	9
Figure 4: Évolution des glucides lors de l'empâtage (adapté de Univers Bière)...	16
Figure 5 : Diagramme de l'activité de chaque enzyme en fonction de la température (°C), en supposant l'acidité optimale...	18
Figure 6: Couleur de la bière conseillée suivant le RA...	19
Figure 7: Expression des houblons suivant le temps de cuisson (minutes)...	29
Figure 8: Humulone...	29
Figure 9 : Principe mécanique du tourbillon...	33
Figure 10: Molécule d'ADP / source : Wikipédia...	34
Figure 11: Activité des levures (jours)...	35
Figure 12: Vocabulaire d'une bouteille...	39
Figure 13: Dissolution du CO ₂ selon la température...	39
Figure 14: Formation de la mousse (détail)...	44
Figure 15: Détails structuraux de la mousse à plusieurs échelles...	45
Figure 16: Molécule de sulfure de diméthyle...	54
Figure 17: 2 buveurs de bière sur un sceau à Gwara (Irak) daté de -3800...	60
Figure 18: Domestication des levures (représentation phylogénétique)...	68
Figure 19: Anneau de brassage Norvégien, 19e siècle Source : wikimedia commons...	70
Figure 20: Thermodynamique et brassage...	73
Figure 21 : les modes de transfert thermique...	74
Figure 22: Constante de Henry : CO ₂ dans l'eau...	81
Figure 23: Pression de vapeur saturante de l'eau...	82
Figure 24: Refroidissement...	84
Figure 25: Étapes de la formation d'une bulle de vapeur d'eau...	85
Figure 26: Isotherme d'un gaz parfait (P,V,T) (source : wikipédia)...	88
Figure 27: Processus microscopique d'évaporation et de condensation...	90
Figure 28: Représentation d'un atome / source : wikipédia.fr...	95
Figure 29: Représentation d'une molécule H ₂ O...	96
Figure 30: Illustration simplifiée d'une liaison de covalence / source : Wikipédia...	99
Figure 31: Illustration simplifiée d'une liaison ionique / source : Wikipédia...	99
Figure 32: Polarité d'une molécule d'eau / source : wikipédia commons...	100
Figure 33: Tableau périodique des éléments chimiques / source : wikipédia.fr...	101
Figure 34: Principaux changements d'état de la matière (source : Wikipédia)...	102
Figure 35: Exemple d'un diagramme de phase (source : Wikipédia)...	103
Figure 36: Hydrolyse du saccharose...	107
Figure 37: Phénol : groupe hydroxyle -OH...	109
Figure 38: Molécule H ₂ O...	114
Figure 39: Cycle de l'eau / source : wikipédia.fr...	115
Figure 40: Dureté de l'eau en France...	120
Figure 41: Équilibre des composés carbonates dans une solution aqueuse, suivant l'acidité à température ambiante...	123
Figure 42: Cycle d'équilibre des composés carbonatés d'une solution aqueuse...	124
Figure 43: Anatomie d'une graine d'orge...	126
Figure 44: Le Glucose...	126
Figure 45: Arbre phylogénétique des céréales de brassage...	128
Figure 46: Orge commune source : wikipédia.fr...	129
Figure 47: Blé tendre source : wikipédia.fr...	130
Figure 48: Épeautre source : wikipédia.fr...	130
Figure 49: Engrain source : wikipédia.fr...	131
Figure 50: Amidonnier source : wikipédia.fr...	131
Figure 51: Seigle source : wikipédia.fr...	132
Figure 52: Avoine source : wikipédia.fr...	132
Figure 53: Riz source : wikipédia.fr...	133
Figure 54: Maïs source : wikipédia.fr...	133
Figure 55: Sorgho source : wikipédia.fr...	134
Figure 56: Millet source : wikipédia.fr...	134
Figure 57: Sarrasin source : wikipédia.fr...	135
Figure 58: Monomère de Glucose...	136
Figure 59: Sucres simples...	137
Figure 60: 3 osides courants...	138
Figure 61: Amidon (extrait) : amyloses + amylopectines...	139
Figure 62: Alpha-Amylase salivaire humaine / source : wikipédia.fr...	146
Figure 63: Bêta-amylase d'orge source : wikipédia.fr...	146
Figure 64: Protéase source : Wikipédia...	149
Figure 65: Principe de l'hydrolyse des chaînes de glucoses par les enzymes Amylases...	151
Figure 66: Bourgeonnement de levures...	153
Figure 67: Anatomie d'une cellule de levure...	154
Figure 68: Arbre phylogénétique des levures de brassage...	157
Figure 69: Plusieurs cultures mixtes de Kveik...	160
Figure 70: Bactéries...	163
Figure 71: Illustration : wikipédia.fr...	166
Figure 72: Conversion des volumes liquides : métrique / américain...	169
Figure 73: Conversion des masses : métrique / américaine...	170
Figure 74: Correspondance température : °C / °F...	171
Figure 75: Masse volumique apparente...	172
Figure 76: Représentation de la pression . Source : wikipédia.fr...	172
Figure 77: Calcaire / Tartre...	178
Figure 78: Conversion densité : g/L / °P...	179
Figure 79: Spectre de la lumière visible (nm)...	186
Figure 80: Conversion couleur : EBC / SRM / Lovibond...	186

Index des tableaux

Tableau 1 : Phases du brassage...	5
Tableau 2 : Comparaison des aliments fermentés...	6
Tableau 3: Table des taux de modification du malt...	11
Tableau 4 : Températures de caramélisation...	14
Tableau 5 : Principaux glucides présents dans le moût...	17
Tableau 6 : Principaux enzymes du malt et leurs caractéristiques...	17
Tableau 7 : Principaux sels et leurs caractéristiques...	22
Tableau 8: Base chimique des saveurs primaires...	51
Tableau 9 : Pouvoir sucrant des principaux glucides...	52
Tableau 10: Principaux styles en 1900 dans l'Empire Britannique...	64
Tableau 11: Principales caractéristiques des familles de levures...	69
Tableau 12: Table chronologique des grandes étapes technologiques...	70
Tableau 13: Mode d'échanges thermiques...	74
Tableau 14: Capacité thermique massique de quelques éléments...	76
Tableau 15: Conductivité thermique des quelques éléments...	77
Tableau 16: Coefficient de dilatation de l'eau et l'éthanol...	86
Tableau 17: Caractéristiques des nucléons...	95
Tableau 18: Exemple : isotopes de l'hydrogène...	96
Tableau 19: Changement d'état de quelques matériaux...	103
Tableau 20 : Quelques groupes fonctionnels principaux (nomenclature IUPAC)...	108
Tableau 21: Les 22 acides aminés protéinogènes...	111
Tableau 22: Table des ratios Sulfates/Chlorures et des styles recommandés...	122
Tableau 23: Désignation des sels minéraux courant en brassage...	127
Tableau 24: Gluten dans les principales céréales...	127
Tableau 25: Caractéristiques principales des glucides...	139
Tableau 26: Les 6 groupes de classification des enzymes...	145
Tableau 27: Règles du vivant...	152
Tableau 28: Unités de volume (SI)...	168
Tableau 29 : Conversion des unités de volume...	169
Tableau 30 : Unités apothicaire (volume)...	169
Tableau 31 : Unités de masse (SI)...	170
Tableau 32: Conversion des unités de masse système Impérial...	170
Tableau 33: Unités de température...	171
Tableau 34: Masse volumique de quelques éléments...	172
Tableau 35: Unités de pression...	173
Tableau 36: Unités temporelles...	175
Tableau 37: Exemples de pH...	176
Tableau 38: Table des coefficients de conversion TAV selon l'écart de densité...	182
Tableau 39: Potentiel théorique maximal des malts...	183
Tableau 40: Pouvoir diastique des malts...	184