



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا لأساتذة التعليم التكنولوجي \_ سكيكدة \_



قسم التكنولوجيا

التخصص: هندسة الطرائق

مذكرة لنيل شهادة أستاذ تعليم ثانوي

بعنوان:

إنتاج وقود حيوي (الإيثانول) انطلاقا من مخلفات التمور: نمذجة كيومترية لعملية التخمر

من إعداد:

- هبول مسعودة
- بن فردي نور الهدى
- حناشي نور الهدى

تحت إشراف الأستاذ:

- بن جفال حسان

لجنة المناقشة:

- |                |                   |                   |
|----------------|-------------------|-------------------|
| رئيس اللجنة    | أستاذ محاضر قسم أ | • بوكرش اكرام     |
| الأستاذ المشرف | أستاذ تعليم عالي  | • بن جفال حسان    |
| عضوا مناقش     | أستاذ محاضر قسم أ | • كرايم خير الدين |

السنة الجامعية 2025/2024

# الشكر والعرفان

الحمد لله الوهاب المتان، الحمد الذي إذا أعطى أدهش، وإذا رزق أغنى، وإذا أنعم أتم، وإذا كلف أعان.  
الحمد لله على جزيل فضله، وسابغ نعمه، وعظيم إحسانه.

الحمد لله الذي علمنا وفهمنا، وكرمنا وفضلنا على كثيرٍ من خلق تفضيلاً.  
نحمده ونشكره أن وفقنا لإتمام هذا العمل المتواضع، سائلين إياه أن يتقبله منا، ويجعله خالصاً لوجهه، وفي ميزان حسناتنا ووالدينا وأستاذنا  
المشرف.

نتوجه بخالص الشكر وعظيم الامتنان والدعاء لأستاذنا المشرف، الأستاذ القدوة الدكتور بن جفال حسان، على ما بذله من جهد، وما غمرنا  
به من صبر وتوجيه ودعم طيلة فترة إنجاز هذه المذكرة.

كما نتوجه بخالص الشكر لأعضاء لجنة المناقشة على تفضلهم بقبول مناقشة هذه المذكرة وتقييمها.  
ونخص بالشكر أيضاً كل أساتذتنا الأفاضل، وعلى رأسهم أساتذة قسم التكنولوجيا، وكافة القائمين على إدارة هذا القسم، كلٌّ باسمه ومقامه.  
وأخيراً، نعرب عن امتناننا الصادق لكل من ساندنا ووقف إلى جانبنا من أصدقاء وزملاء، وكل من مدّ لنا يد العون، ولو بكلمة طيبة.  
جزاهم الله عنا كل خير.



# الإهداء

﴿وَقُلْ رَبِّ زِدْنِي عِلْمًا﴾ - [طه: 114]

آمنت بها قلباً، ورددتها لسائاً، فزادني الله من فضله علماً ورفعة.  
فله الحمد أولاً وآخراً، ظاهراً وباطناً، سرّاً وجهراً، على ما كان وما سيكون، وما هو كائنٌ بحكمته وتقديره.  
فبكل حب اهدي ثمرة نجاحي وتخرجي إلى

والذي من تجسدت فيه معاني العطاء، وتجلّى فيه الصبر جهاداً، والمروءة عملاً....

يا مَنْ خُلِّقَتْ له الألقاب فعجزت أن تفيّه، وارتفعت له المقامات فعزّ أن يُدرك قدره وصف، يا من جعلت من التعب راحةً لأجل راحتي، ومن السهر نوراً لمسيرتي، ورافقتني في السفر لا رجاءً إلا أن أبلغ. كنت لي عماداً لا يبيل، وسنداً لا يخون، وعطاءً لا ينقطع، تمضي لأجلي تعباً، وتعود بقلبٍ راضٍ، لا تسألني سوى أن أواصل، وأمضي، وأبلغ.

﴿رَبِّ ازْمِمْهُمَا كَمَا رَبَّيْتَنِي صَغِيرًا﴾ - [الإسراء: 24]

دعاءً يتردد في قلبي كلما ذكرتك، وكلما رأيت أثرك فيّ، وكلما تذكرت أنك كنت السائرَ بجاني، لا بخطواتك، بل بجهدك ومالك وقلبك.  
فيا أبي... كل ما أكتبه اليوم هو من نورك، وكل ما بلغته إنما هو غصنٌ من شجرة سقيتها بعمرك.

أبي ملاك وصبر جميل تميل الدنيا وحاشة تميل

إليك يا مَنْ لا تفيك الحروف، ولا تُدركك اللغة، ولا ترتقي إليك البلاغة...

يا مَنْ كنت لي وطناً حين ضاقت بي الدنيا، وكنتم حين ثقل الحمل، وقلبتا وسعني حين ضاق كلّ شيء. يا جُند الخفاء، وسرّ الدعاء، يا من سكبت من عمرك في أيامي، ومن صحنتك في راحتي، ومن ليلك في نومي، ومن روحك في سُكوبي. يا من جفّت عيناها ليرتوي عطشي إلى الطمأنينة، وذبلت لُزهراً أنا، وانحنت لتستقيم خطواتي في درب العلم. تُطوّقيني بدعائك كأنك تحامين عني بجناح من نور.

﴿وَوَصَّيْنَا الْإِنْسَانَ بِوَالِدَيْهِ إِحْسَانًا﴾ - [الأحاف: 15]

فلك مني سَكينة القلب، وعمراً من الدعاء لا ينقطع. وإن سَطَّرت هذه المذكرة حروفاً، فكلُّ حرفٍ فيها دَينٌ في عنقي لك.

إخوتي، عضدي وسندي، ومَنْ قال فيهم الله جلّ جلاله:

﴿سَدَّدْ عَضُدَكَ بِأَخِيكَ﴾ - [التقص: 35]

فشَدَّ الله أزرِي بكم، وطيب خاطري بحضوركم، وبارك لي أعماركم.

أخي جاسم، من غدقني بالخوف الخفي، ولقني بحرصه دون أن يشعر، كنت الساكناً الهادئ الذي يجرسني بصمت، والواقف في الظلّ ليحجب عني كل تعب. كنت لي ظهراً لا يُرى، لكنه يُشعر، وأماناً لا يُقال، لكنه يُعاش. رفقتك كانت نعمة، وصمتك المحب كان أبلغ من آلاف الكلمات.  
أخي الصغير آدم، مدللي، وقطعة من قلبي، ما سرث يوماً إلا وقد سبقتني محبتك، ما غادرث البيت يوماً إلا وقد سبقتني بكأوك، وما ودعتك إلا وخلفت في قلبي أثراً لا يُنسى. فيك عرفتُ كيف تكون الأمومة شعوراً، لا مقاماً، وكيف يسكن الحنانُ في جسدٍ صغيرٍ وعقلٍ كبير.

**أختي الكبرى وسام**، من جعلت خوفها سورًا من الأمان حولي، كنت تخشين عليّ بصوتٍ خافت، تقلقين في صمت، حرصك الجميل عليّ، وطبّي أنت .

**أختي الصغيرة إيمان** من كانت الرضا حين تشتدّ التكاليف، كانت الطمأنينة حين يضيق الوقت وبسمة تنسيني تعب الطريق

قال رسول الله ﷺ: **"هم قوم تحابوا بروح الله، على غير أرحام بينهم"**

إلى من شاركتني الغرفة الجامعية، فصارت أكثر من رفيقة سكن، تألقنا في صمت الأيام وضحيجها، فصارت تفاصيلها لا تكتمل إلا بها. لم تكن مجرد حضور عابر، بل كانت جزءًا من يومي، ووعودًا في غربتي، وسندًا لا يُنسى. في صحبتها سكنت الغربة، وخفّ التعب، وازدهرت الذاكرة بلحظات لا تُعوّض. فكنت من أئمن ما وهبني الله في هذه الرحلة. **تسليم**

إلى خليلي الأول، ورفيقة الروح، إلى من كانت أنسي في البعد، وسكني في القرب، حال بيننا المكان، ولكن الأرواح إذا تألفت، لا تفرّقها المسافات، حاضرة بأثرها، ثابتة بولائها، وكأنّ روحها ما زالت تسكن جوار روحي محبا ابتعدنا. **وسام**

إلى تلك التي تحدّثت طويلاً عن زرقه عينها، رحمة من الله أهديت لي، فكانت حضورًا يبهج القلب، يد طاهرة ازالته عن طريقي الكثير، رفقة تُشبه النعم، من جادت عليا بأوقاتنا وكرمها ولطفها. **خلي عفاف**

**إلى نورٍ أشرقت به أيامي، واطمأنت به روحي**

من لم يكن اسمها صدفة، بل كان وعدًا من الله: **"نورٌ على نور يهدي الله لنوره من يشاء"**. جاءتني في لحظة احتجت فيها إلى سكينه، فكانت هي السكينه. أستاذتي في القرآن، ومعلمتي في الحرف، ومُلهمتي في الرفق، رفيقتي في مقاعد العلم، بها طابت الجامعة، وازدهرت الأيام، وازدانت رحلتي بما لا يُنسى. وفي رحلة التخرّج، كانت لي عضدًا وسندًا، نجز الحرف معًا، ونصبر على البحث معًا، ونضحك في التعب معًا. مع رفيقتي الجميلة هدى ثالثتنا في الدرب كتنا ثلاثًا في الجهد، وثلاثًا في الوفاء، وثلاثًا في الحصاد بهجة الأيام أتم. **نور، هدى**

صديقاتي، القربيات بالخطى أو بالذكرى، كنتن سندًا في لحظات التعب، وبهجة في أوقات المسير فالشكر لا يفيكّن، والدعاء لكنّ باقي ما بقي الودّ. **إلى بنات حلقة النور أخوات القرآن**، جمعني بكنّ كتاب الله، فكانت زينة الرحلة، وخير الصحبة، ورفقة النور في دربٍ اختصّه الله بالفضل.

**إلى أهل العلم والفضل**

مشايخي وأستاذاتي، معلمي الناس الخير، من غرسوا في قلبي نور العلم

من كانت للخير سبيلًا، وللعطاء سُنّة. **الأستاذة فوزية**

إلى من كان قدوة في الخلق، ونبراس في العلم، كان لتوجيهه أثر لا يُنسى. **الأستاذ بن جفال حسان**

**إلى مشروع "حافضة الذكر"**، ذلك الثغر المبارك إلى المرابطات به اللواتي ندرن أنفسهن لخدمة كلام الله، فلهنّ جميعًا من القلب دعاء لا ينقطع، ومن الذاكرة مقام لا يزول.

**ومسك الختام، أهدي تخرّجي...**

إلى أطفال غزة، وإلى المرابطين على ثغور العزة، إلى أولئك الذين لم تكتمل فصولهم الدراسية، لأنّ السماء كانت تمطر نارًا بدل الغيم،

إلى من حملوا القلم حلقًا، وحملوا الوطن في صدورهم عهدًا، هذا التخرّج باسمي... لكنه لأجلكم

**قال تعالى: {وَأَصْبِرُوا إِنَّ اللَّهَ مَعَ الصَّابِرِينَ} [الأفقال: 46].**



## الإهداء

إلى المدافعين عن شرف هذه الأمة، الصابرين المحتسبين رغم الجوع والدمار.  
إلى المرابطين على الثغور لأكثر من ستمئة يوم.  
إلى أطفال غزة الأبطال الذين علمونا الصبر والاحتساب.  
إلى روح الروح وهند وآل النجار.

إلى والديّ الحبيين.  
إلى زوجي وسندي.  
إلى لطف الله الحفي، أختي وكنتي ريان.

إلى معلمي الناس الخير.  
إلى مشايخي وشيخاتي وكل من علمني حرفاً.  
إلى أم الخير والعطاء أمي فوزية.  
إلى قدوتي في ثغر التعليم الأستاذ بن جفال حسان.

إلى رفيقتي عمري مودة وهدي.  
إلى صديقتي الصدوق شروق.  
إلى بهجة حياتي خديجة.  
إلى هاروني رانية.

إلى المرابطات على ثغر حافظة الذكر، الخادما للقرآن وأهله.  
إلى بنات أم النور وكل بنات مشروع حافظة الذكر



## الإهداء

من قال أنا لها " نالها "

لم تكن الرحلة قصيرة ولا ينبغي لها أن تكون، لم يكن الحلم قريباً ولا الطريق كان مخوفاً بالتسهيلات، ولكنني فعلتها وملتأها. الحمد لله حبا وشكراً وامتناناً على نعمه التي لا تعد ولا تحصى، الحمد لله على ما كان حلماً وأصبح حقيقة.

﴿وَقُلْ رَبِّ ارْحَمْهُمَا كَمَا رَبَّيْتَنِي صَغِيرًا﴾

إلى أول من آمن بي حين كنت لا أملك من أمري شيئاً، إلى من زرعاً فيّ الثقة وأروياً روحي بالصبر والدعاء، إلى من كانا سندي الحقيقي ومعنى الأمان في كل مراحل " أمي وأبي "، أتأنا النور في طريقي، وسبب ما أنا عليه اليوم. فلكما في القلب دعاء لا ينقطع، وامتنان لا يفبه اللسان

﴿سَنَسْتُدُّ عَضُدَكَ بِأَخِيكَ﴾

وإلى من شدّ الله به أزرعي ورفع به معنوياتي، إلى من كان أختاً وصديقاً وظلاً لا يفارقي "أخي آدم"، كنت العون حين تهاوى صبري، والسند حين مال ظهري، أدامك الله ضلعاً ثابتاً لي وإلى أختي الغالية إيمان، ورفيقتي في الفرح والمسؤولية، إلى ملاك وشيئا، أنتن زأد أيامي ورفقة دربي، كنتم دائماً بجانبني، في صمتي وكلامي، في قوتي وضعفي، فلکم من قلبي كل الشكر والحب ولا أنسى من كانا لي خير إخوة في الحنان والدعم، "عمي سامي وعمي عادل"، لكما من الدعاء أوفاه ومن الحب أعظمه، فقد كنتم دائماً ركيزتين صلبتين في أوقاتي كلها

﴿وَرَفَعْنَا لَكَ ذِكْرَكَ﴾

إلى فقيدي الغالي، جدي الحبيب، ما نسينك يوماً، وما غابت روحك عن قلبي، كل إنجاز أقدمه بين يديك، أسأل الله أن يجعله في ميزان حسناتك، ويجزيك عني خير الجزاء وإلى من شاركني تفاصيل الرحلة، وامترجت أرواحهنّ معي في التعب والفرح، رفيقتي نور، ومسعودة، كنتنّ النور في العتمات والدعم في كل محطة

وإلى صديقاتي وخليلات قلبي: نازا، رانيا، إيمان، رحمة، ومريم... لكل ضحكة، ولكل حضن، ولكل وقت عشنا فيه معنى الأخوة. شكراً لكنّ من كل قلبي

إلى كل من دعمني ولو بكلمة، بصمت، بدعاء في ظهر الغيب، أتم جميعاً خيوط النور التي نسجت هذا النجاح

﴿وَأَخِرُ دَعْوَاهُمْ أَنِ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ﴾

## الملخص

يُعدّ البيوايثانول من أهم أنواع الوقود الحيوي البديل، وذلك نظرًا لخصائصه البيئية الجيدة وإمكانية إنتاجه من مصادر طبيعية متجددة، مما يجعله أحد الخيارات الاستراتيجية في ظل توجه العالم نحو الطاقات النظيفة. وفي هذا الإطار يندرج هذا العمل ضمن جهود البحث عن بدائل طاقوية مستدامة، قليلة التكلفة ونظيفة، من خلال الاستغلال الأمثل لمخلفات التمور، لا سيّما تمر "الغرس"، باعتباره مادة أولية غنية بالسكريات وقليلة القيمة التجارية بالمقارنة بباقي التمور، مما يفتح آفاقًا واسعة لإعادة تهيئتها وتوظيفها في إنتاج البيوايثانول.

وقد تم إنجاز هذا العمل على مرحلتين مترابطين: مرحلة الاستخلاص، وكان الهدف منها استخلاص السكريات بأعلى تركيز ممكن، انطلاقًا من 1 غرام من تمر الغرس. ولتحقيق هذه الغاية، تم دراسة تأثير عوامل أساسية على هذه العملية والمتمثلة في: كتلة التمر / حجم الماء ( $\frac{m}{v}$ ) (0.1- 0.55)، درجة حرارة الاستخلاص ( $T_{ex}^{\circ}$ ) (60 - 90 درجة مئوية) و زمن الاستخلاص ( $t_{ex}$ ) (30- 120 دقيقة) أظهرت النتائج المتحصّل عليها أن أفضل نسبة لاستخلاص السكريات سُجّلت تحت الشروط التالية: النسبة بين كتلة التمر وحجم الماء ( $\frac{m}{v} = 0,1955$ )، درجة حرارة الاستخلاص ( $T_{ex} = 43,03^{\circ}C$ ) وزمن استخلاص ( $t_{ex} = 34,74min$ ).

بينما شملت المرحلة الثانية عملية التخمير، والتي تم من خلالها تحويل السكريات المستخلصة في المرحلة الأولى إلى إيثانول بواسطة خميرة *Saccharomyces cerevisiae*، وللحصول على عملية تخمر مثالية، تم دراسة تأثير مجموعة من العوامل أساسية على هذه العملية بما فيها درجة الحموضة الوسط (pH) (4.5- 6)، كمية أنوية التمر المضافة ( $m_{nd}$ ) (0 - 3 غرام / لتر)، كمية الخميرة ( $m_l$ ) (0.25- 3 غرام / لتر)، و مدة التخمير ( $t_f$ ) (20 - 72 ساعة). وقد تمّ نمذجة تأثير هذه العوامل باستعمال منهجية تصميم التجارب (DOE)، باعتماد نموذج Box- Behnken Design (BBD) من أجل تحديد الشروط المثلى لكل مرحلة. النتائج المتحصّل عليها أظهرت انه تمّ تحقيق أفضل مردودية للإيثانول في الشروط التالية: كمية الخميرة ( $m_l = 3 \frac{g}{l}$ )، كمية أنوية التمر ( $m_{nd} = 1,51 \frac{g}{l}$ )، درجة الحموضة (pH=4,36) و زمن التخمير ( $t_f = 72h$ )، والتي سمحت بالحصول على مردود قدره 0.391 غرام إيثانول لكل غرام من تمر الغرس.

## Résumé

Le bioéthanol est considéré comme l'un des biocarburants alternatifs les plus importants, en raison de ses bonnes propriétés environnementales et de la possibilité de le produire à partir de ressources naturelles renouvelables, ce qui en fait une option stratégique dans le cadre de l'orientation mondiale vers les énergies propres. Dans ce contexte, ce travail s'inscrit dans les efforts de recherche de solutions énergétiques durables, peu coûteuses et propres, à travers la valorisation optimale des résidus de dattes, notamment la variété "Ghars", en tant que matière première riche en sucres et de faible valeur commerciale comparée aux autres types de dattes. Cela ouvre de larges perspectives pour sa revalorisation et son utilisation dans la production de bioéthanol.

Ce travail a été réalisé en deux étapes interdépendantes :

La première étape, dédiée à l'extraction, avait pour objectif d'extraire les sucres à la concentration la plus élevée possible, à partir de 1 gramme de dattes Ghars. Pour atteindre cet objectif, l'effet de plusieurs facteurs clés a été étudié : le rapport masse de dattes / volume d'eau ( $m/v$ ) (0,1 - 0,55), la température d'extraction ( $T_{ex}$ ) (60 - 90 °C), et le temps d'extraction ( $t_{ex}$ ) (30 - 120 minutes). Les résultats obtenus ont montré que le meilleur rendement en sucres a été enregistré dans les conditions suivantes : un rapport masse/volume de ( $m/v = 0,1955$ ), une température d'extraction  $T_{ex} = 43,03$  °C et un temps d'extraction  $t_{ex} = 34,74$  minutes.

La deuxième étape a porté sur le processus de fermentation, durant lequel les sucres extraits lors de la première phase ont été transformés en éthanol à l'aide de la levure *Saccharomyces cerevisiae*. Afin d'optimiser ce processus, l'effet de plusieurs facteurs essentiels a été étudié : le pH du milieu (4,5 - 6), la quantité de noyaux de dattes ajoutée ( $m_{nd}$ ) (0 - 3 g/L), la quantité de levure (ml) (0,25 - 3 g/L) et la durée de fermentation ( $t_f$ ) (20 - 72 heures). L'influence de ces facteurs a été modélisée en utilisant la méthodologie de plan d'expériences (DoE), en adoptant le modèle Box-Behnken Design (BBD) pour déterminer les conditions optimales à chaque étape. Les résultats obtenus ont montré que le meilleur rendement en éthanol a été obtenu dans les conditions suivantes : quantité de levure  $ml = 3$  g/L, quantité de noyaux de dattes  $m_{nd} = 1,51$  g/L,  $pH = 4,36$  et durée de fermentation  $t_f = 72$  h, permettant d'atteindre un rendement de 0,391 gramme d'éthanol par gramme de dattes Ghars.

## Abstract

Bioethanol is considered one of the most important types of alternative biofuels due to its favorable environmental properties and its potential to be produced from renewable natural resources. This makes it a strategic option in the global shift towards clean energy. In this context, the present work falls within the framework of efforts to find sustainable, low-cost, and clean energy alternatives through the optimal exploitation of date palm waste—particularly the "Ghars" variety—which is rich in sugars and has low commercial value compared to other types of dates. This opens up broad prospects for its valorization and use in bioethanol production.

This work was carried out in two interrelated phases:

The first phase, extraction, aimed to extract sugars at the highest possible concentration from 1 gram of Ghars dates. To achieve this goal, the influence of key factors on the extraction process was studied, namely: date mass to water volume ratio ( $m/v$ ) (0.1–0.55), extraction temperature ( $T_{ex}$ ) (60–90 °C), and extraction time ( $t_{ex}$ ) (30–120 minutes). The results showed that the best sugar extraction yield was obtained under the following conditions: date-to-water ratio ( $m/v = 0.1955$ ), extraction temperature ( $T_{ex} = 43.03$  °C), and extraction time ( $t_{ex} = 34.74$  minutes).

The second phase involved the fermentation process, during which the sugars extracted in the first phase were converted into ethanol using the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. To achieve optimal fermentation, the effects of several key factors were studied, including: pH level (4.5–6), amount of date pits added ( $m_{nd}$ ) (0–3 g/L), yeast concentration ( $m_l$ ) (0.25–3 g/L), and fermentation time ( $t_f$ ) (20–72 hours). The influence of these factors was modeled using Design of Experiments (DOE), specifically the Box-Behnken Design (BBD), to determine the optimal conditions for each phase. The results showed that the highest ethanol yield was achieved under the following conditions: yeast concentration ( $m_l = 3$  g/L), date pits quantity ( $m_{nd} = 1.51$  g/L), pH = 4.36, and fermentation time ( $t_f = 72$  h), resulting in a yield of 0.391 grams of ethanol per gram of Ghars dates.

## الإسم العلمي

## الإختصارات والرموز

ميثيل ثالثي بوتيل الإيثر الحيوي	Bio-MTBE
ميثيل ثالثي بوتيل الإيثر الحيوي	Bio-MTBE
إسترات ميثيلية للأحماض الدهنية	EMAG
بنزين ممتاز يحتوي على 10% من الإيثانول الحيوي	SP95-E10
بنزين ممتاز (خالٍ من الرصاص) أوكتان 95	SP95
بنزين ممتاز (خالٍ من الرصاص) أوكتان 98	SP98
وقود يحتوي على نسبة من الإيثانول تتراوح بين 65% و 85 %	E85
ثاني أكسيد الكربون	CO <sub>2</sub>
الجماعة الأوروبية	CE
الأس الهيدروجيني	pH
أيونات الهيدروجين	H <sup>+</sup>
Saccharomyces cerevisiae الخميرة السكرية البيرة	S. Cerevisiae
كيلوكالوري	Kcal
Design of Experiments تصميم التجارب	DOE
تحليل التباين	ANOVA
المتغيرات المركزية المعيارية	v.c.r
نموذج الاستجابة الخطي	PDAI
منهجية سطح الإستجابة	RSM
مجموع المربعات الكلي	SS <sub>tot</sub>
مجموع المربعات العائد إلى الانحدار	SS <sub>reg</sub>
مجموع المربعات العائد إلى البواقي	SS <sub>res</sub>
متوسط مربعات الانحدار	MS <sub>reg</sub>
متوسط مربعات البواقي	MS <sub>res</sub>
معامل التحديد المعدل	Radj <sup>2</sup>
معامل التحديد	R-sq أو R <sup>2</sup>
دالة الرغبة	DF
دالة الرغبة الفردية	di
الإستجابة	U
دالة الرغبة الشاملة	D

الاحتمالية	P
الكثافة على الحجم	$\frac{m}{v}$
درجة حرارة الإستخلاص	$T_{ex}$
زمن الزمن الإستخلاص	$t_{ex}$
الغرام على اللتر	$\frac{g}{l}$
سلسيوس	$^{\circ}C$
الدقيقة	min
المردود	%R
كتلة السكر	$m_{sucre}$
النسبة بين كتلة السكر المستخلص وكتلة التمر	$m\_sucre/m\_datte$
كتلة أنوية التمر	$m_{nd}$
كتلة الخميرة	$m_l$
زمن التخمر	$t_f$
ساعة	h
تصميم بوكس-بهنكن	BBD
عدد العوامل	k
عدد العوامل المدروسة	$\epsilon$
عدد نقاط المركز المطبقة لاختبار الحدود التريبعية بين المستويات المنخفضة والعالية	P
متوسط قيمة النتيجة	$a_0$
المعاملات الخطية	$a_i$
معاملات التفاعل بين العوامل المدروسة	$a_{ijk}, a_{ij}$
العوامل المستقلة	$X_1, X_2, X_k$
إحصاء اختبار يستخدم لمقارنة تباينات النماذج، ويُستخدم في تحليل التباين لتحديد دلالة النموذج	F-Value
القيمة الاحتمالية، تمثل احتمالية الحصول على نفس النتائج تحت الفرضية العدمية، وتُستخدم لتحديد دلالة النتائج	P-Value
إحصاء اختبار T ، يُستخدم لمقارنة متوسطات أو لتحليل دلالة معاملات الانحدار في النماذج	F-Test
معامل التحديد التنوي	$R^2 \text{ pré}$
الإستجابة المثلى المتوقعة	$y_p$

## قائمة الجداول

### الفصل الثالث

الجدول.III. 1 يمثل الأنواع المختلفة لمخططات التجارب..... 28

### الفصل الرابع

الجدول.IV. 1: المكونات الأساسية لتمر الغرس ..... 37

الجدول.IV. 2: العوامل المؤثرة في عملية الإستخلاص ..... 39

الجدول.IV. 3: تجارب الإستخلاص ..... 39

الجدول.IV. 4: العوامل المؤثرة في عملية التخمر ..... 41

الجدول.IV. 5: تجارب التخمر ..... 42

### الفصل الخامس:

الجدول.V. 1: المستويات المختلفة للعوامل التي تم العمل بها في دراسة نسبة السكر في عصير التمر ومردود استخلاصه ..... 45

الجدول.V. 2: مصفوفة تصميم BBD وقيم نسبة السكر في عصير التمر ومردود استخلاصه المتوقعة والمتحصل عليها ..... 47

الجدول.V. 3: معاملات الانحدار المقدرة لتحسين نسبة السكر في عصير التمر ..... 49

الجدول.V. 4: معاملات الانحدار المقدرة لتحسين مردود إستخلاص التمر ..... 50

الجدول.V. 5: قيم الإستجابة Y التي تم الحصول عليها في الشروط المثلى ..... 55

الجدول.V. 6: المستويات المختلفة للعوامل التي تم العمل بها في دراسة مردود إنتاج الإيثانول ..... 56

الجدول.V. 7: مصفوفة تصميم BBD وقيم مردود إنتاج الإيثانول المتوقعة والمتحصل عليها ..... 58

الجدول.V. 8 : معاملات الانحدار المقدرة لتحسين جودة الترسيب ..... 60

الجدول.V. 9. قيم الإستجابة Y التي تم الحصول عليها في الشروط المثلى ..... 63

## قائمة الأشكال

### الفصل الأول

- الشكل I. 1: إنتاج الإيثانول الحيوي من الجيل الأول..... 4
- الشكل I. 2: إنتاج الإيثانول الحيوي من الجيل الثاني..... 4
- الشكل I. 3: إنتاج الإيثانول الحيوي من الجيل الثالث..... 5
- الشكل I. 4: إنتاج الإيثانول الحيوي من المصادر النباتية..... 6
- الشكل I. 5: سعر لتر الإيثانول الحيوي في عدة دول..... 10

### الفصل الثاني

- الشكل II. 1: الخميرة S. CEREVISIAE تحت المجهر الإلكتروني الماسح..... 12

### الفصل الثالث

- الشكل III. 1: مخطط عملية أكتساب المعارف..... 18
- الشكل III. 2: يُمثّل كل عامل بمحور مدرّج وموجّه. المحاور الخاصة بالعوامل متعامدة فيما بينها. الفضاء المُعرّف بهذه الطريقة يُمثّل الفضاء التجريبي..... 22
- الشكل III. 3: يتكوّن مجال تغيّر السرعة من جميع السرعات المحصورة بين 80 و120 كم/سا. يُمثّل المستوى المنخفض للعامل بالرمز -1، ويُمثّل المستوى المرتفع بالرمز +1..... 22
- الشكل III. 4: يُعرّف مجال الدراسة على أنه اتحاد مجالات العوامل المختلفة (في هذه الحالة، لا توجد قيود)..... 23
- الشكل III. 5: يُعرّف مجال الدراسة على أنه اتحاد مجالات العوامل المختلفة (في هذه الحالة، لا توجد قيود)..... 24
- الشكل III. 6: في الفضاء التجريبي، تُحدّد مستويات العوامل نقاطًا تجريبية..... 25
- الشكل III. 7: يُشكّل مجموع الاستجابات الذي يُطابق جميع نقاط مجال الدراسة سطح الاستجابة..... 26
- الشكل III. 8: توضيح الأثر الكلي والأثر المتوسط..... 27
- الشكل III. 9: منحنيات التفاعلات..... 27
- الشكل III. 10: قيم المكونات في مخطط مزيج بثلاثة مكونات. [5]..... 29
- الشكل III. 11: سطح الإستجابة..... 31
- الشكل III. 12: مخطط مركب مركزي..... 32
- الشكل III. 13: تمثيل تخطيطي لمخطط BOX-BEHNKEN لثلاثة عوامل. [5]..... 33

### الفصل الرابع

- الشكل IV. 1: المادة الأولية المستخدمة في عملية إنتاج الإيثانول (تمر الغرس وأنويته)..... 38
- الشكل IV. 2: عجينة التمر منزوع النوى ومسحوق الأنوية..... 38
- الشكل IV. 3: مراحل عملية إستخلاص السكر من التمر منزوع النوى..... 40
- الشكل IV. 4: جهاز قياس قربة الإنكسار..... 41
- الشكل IV. 5: مراحل عملية التخمر..... 43
- الشكل IV. 6: عملية التقطير..... 44

## الفصل الخامس

- الشكل V. 1: مخطط باريتو للتأثيرات الفردية والمتداخلة للإستجابة الأولى. 51 .....
- الشكل V. 2: مخطط باريتو للتأثيرات الفردية والمتداخلة للإستجابة الثانية. 52 .....
- الشكل V. 3: منحنيات التأثيرات الرئيسية للإستجابة الأولى. 53 .....
- الشكل V. 4: منحنيات التأثيرات الرئيسية للإستجابة الثانية. 54 .....
- الشكل V. 5: تحديد الشروط المثلى للترسيب. 54 .....
- الشكل V. 6: مخطط باريتو للتأثيرات الفردية والمتداخلة. 61 .....
- الشكل V. 7: منحنيات التأثيرات الرئيسية للاستجابات. 62 .....
- الشكل V. 8: نتائج التداخل بين العوامل المدروسة على مردود انتاج الإيثانول. 62 .....
- الشكل V. 9: تحديد الشروط المثلى لعملية التخمير. 63 .....

# الفهرس

1.....	مقدمة عامة.....
4.....	I الفصل الأول: عوميات حول البيوايثانول
3.....	1.I مقدمة.....
3.....	2.I أنواع الوقود الحيوي .....
3.....	3.I الأجيال المختلفة للوقود الحيوي .....
3.....	1.3.I الجيل الاول.....
4.....	2.3.I الجيل الثاني.....
5.....	3.3.I الجيل الثالث.....
5.....	4.I فوائد الوقود الحيوي .....
6.....	5.I البيوايثانول .....
6.....	1.5.I تركيب الايثانول الحيوي .....
6.....	2.5.I الخصائص الفيزيوكيميائية.....
7.....	3.5.I استخدامات الايثانول الحيوي .....
8.....	4.5.I الخطوات اللازمة لانتاج الايثانول انطلاقا من اللجنوسليلوز.....
9.....	5.5.I تكاليف إنتاج الإيثانول الحيوي بحسب العملية المستخدمة .....
12.....	II الفصل الثاني: عمليات التخمير .....
11.....	1.II المقدمة.....
11.....	2. II الأنواع المختلفة لعملية التخمير .....
12.....	2.II الآليات المستعملة للتخمير.....
12.....	1.2.II التخمير الدفعي (غير المستمر Batch_ Mode).....
12.....	2.2.II النمط شبه مستمر (Fed_ Batch).....
12.....	3.2.II النمط المستمر (Mode Continu).....
12.....	2.II 4. المفاعل الحيوي مع إعادة تدوير الخلايا .....
13.....	3.II العوامل المؤثرة في التخمير .....
13.....	1.3.II درجة الحرارة.....
13.....	2.3.II درجة الحموضة .....
13.....	3.3.II مدة التخمير .....

13	..... التحريك 4.3.II
14	..... ثاني أكسيد الكربون 5.3.II
14	..... الإيثانول المحرر في الوسط 6.3.II
14	..... نشاط الماء 7.3.II
14	..... محتوى الأوكسجين 8.3.II
14	..... تركيز السكر 9.3.II
18	..... III الفصل الثالث: تصاميم التجارب
16	..... 1.III مقدمة
16	..... 2.III تصميم التجارب (Design of Experiments - DoE)
16	..... 3.III نبذة تاريخية عن تصميم التجارب
17	..... 4.III مجال تطبيق تصميم التجارب
17	..... 5.III عملية اكتساب المعرفة
19	..... 1.5.III اختيار طريقة التجريب
19	..... 2.5.III تحليل النتائج
19	..... 3.5.III الاكتساب التدريجي للمعرفة
19	..... 6.III دراسة ظاهرة
20	..... 7.III مصطلحات
20	..... 1.7.III الأنواع المختلفة للعوامل
21	..... 2.7.III الفضاء التجريبي (espace expérimental)
22	..... 3.7.III مجال العامل (domaine d'un facteur)
23	..... 4.7.III مجال الدراسة
24	..... 8.III النقاط التجريبية
25	..... 9.III المتغيرات المركبة المعيارية (المؤزة)
26	..... 10.III أسطح الاستجابة
27	..... 11.III تأثير عامل
27	..... 12.III مفهوم التفاعل
28	..... 13.III النمذجة الرياضية
28	..... 14.III اختيار مخطط تجريبي
29	..... 15.III الأنواع المختلفة لمخططات التجارب
29	..... 1.15.III مخططات الخلطات (Plans de mélanges)
29	..... 2.15.III مخططات الفرز (Plans de criblage):

30	.....III.15.3 طريقة سطح الاستجابة
33	.....III.16.16 تقييم النموذج
33	.....III.16.1 تحليل التباين (ANOVA)
33	.....III.16.2 مجموع المربعات
34	.....III.16.3 التباين
34	.....III.16.4 الإختبار الإحصائي
35	.....III.16.5 دالة الرغبة (Desirability Function)
38	.....IV الفصل الرابع: المواد و الطرق
37	.....IV.1 المقدمة
37	.....IV.2 تحضير المادة الأولية
38	.....IV.3 تجرب إستخلاص السكر
41	.....IV.4 مرحلة التخمير
43	.....IV.5 مرحلة التقطير
44	.....IV.6 الخاتمة
45	.....V الفصل الخامس: تحليل النتائج
46	.....V.1.1 تصميم نموذج بوكس-بهنكن الكامل $3^2$
51	.....V.2.1 مخطط باريتو
52	.....V.3.1 تأثير العوامل الفردية على نسبة السكر في عصير التمر
53	.....V.4.1 تأثير العوامل الفردية على مردود استخلاص التمر
54	.....V.5.1 تحديد الشروط المثلى عند دمج الاستجابتين
55	.....V.6.1 تحسين الاستجابة
55	.....V.2 اختيار نموذج التحسين
57	.....V.1.2 تصميم نموذج بوكس-بهنكن الكامل
60	.....V.2.2 مخطط باريتو
61	.....V.3.2 تأثير العوامل الفردية على مردود انتاج الإيثانول
62	.....V.4.2 آثار التداخل بين العوامل المدروسة
63	.....V.5.2 تحديد الشروط المثلى
63	.....V.6.2 تحسين الاستجابة
65	.....VI الخاتمة العامة
65	.....الخاتمة العامة

---

# المقدمة العامة

---

شهد العالم خلال الخمسين سنة الأخيرة نموًا ديموغرافيًا سريعًا، حيث تضاعف عدد السكان في العديد من الدول، وازدادت معدلات التحضر والهجرة من الريف إلى المدن بشكل كبير. هذا النمو السكاني أدى إلى زيادة الحاجة إلى الخدمات الأساسية مثل الكهرباء، المياه والنقل، مما رفع الطلب على الطاقة بمختلف أشكالها. فعلى سبيل المثال، ارتفع استهلاك الطاقة الكهربائية والوقود في الدول النامية والمتقدمة على حد سواء، نتيجة زيادة عدد الأسر والمنشآت الصناعية والتجارية التي تحتاج إلى إمدادات مستمرة من الطاقة. مما أدى إلى الاعتماد على عدة مصادر للطاقة بما فيها الطاقة النووية وخاصة الطاقة الأحفورية، مثل النفط، الفحم الحجري والغاز الطبيعي، هذا التوجه خلق مشاكل بيئية واقتصادية متعددة.

في ظل التحديات البيئية والصحية التي فرضها الاستغلال غير العقلاني لمصادر الطاقة الأحفورية، والتي تسبب في تلوث الهواء والماء والتربة، وزيادة انبعاثات غازات الدفيئة، وظهور ظواهر مناخية قاسية كالاحتباس الحراري والفيضانات والجفاف، ولهذا أصبح البحث عن بدائل نظيفة ومستدامة للطاقة ضرورة ملحة. تشمل هذه البدائل مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية، طاقة الرياح، والطاقة المائية والطاقة الحرارية الأرضية والكتلة الحيوية، والتي تقدم حلولاً مستدامة للحد من تلوث البيئة وتقليل الاعتماد على الموارد المحدودة وغير المتجددة. بالإضافة إلى ذلك، تسهم هذه البدائل في تنوع مصادر الطاقة، وتعزيز الأمن الطاقوي، وتوفير فرص عمل جديدة في قطاعات التكنولوجيا النظيفة، مما يجعل التحول نحو الطاقة المتجددة خيارًا استراتيجيًا لمواجهة سلبية الطاقة الأحفورية وضمان مستقبل أكثر استدامة. من بين البدائل الواعدة، تبرز المصادر الطبيعية لإنتاج الوقود الحيوي (Biofuel) كحل واعد ومستدام. يُستخلص هذا الوقود من الكائنات الحية أو مخلفاتها، كالحاصلات الزراعية والنفايات العضوية، وتتميز بانبعثاته الكربونية المنخفضة نسبيًا مقارنة بالوقود الأحفوري، ما يجعله خيارًا بيئيًا واقتصاديًا جذابًا.

من بين أنواع الوقود الحيوي شيوعاً نجد البيوايثانول، وهو من أكثر أنواع الوقود الحيوي استخدامًا، وهو عبارة عن كحول إيثيلي يُنتج بوساطة عمليات حيوية، على رأسها التخمر الكحولي للسكريات. وقد ازداد الاهتمام به في السنوات الأخيرة نظرًا لخواصه البيئية الجيدة، إذ يُستخدم كمضاف أو بديل للوقود التقليدي، نظرًا لاحتراقه النظيف وقدرته على تقليل انبعاثات الغازات الدفيئة. كما تتميز بإمكانية إنتاجه من مصادر متجددة، ما يجعله خيارًا استراتيجيًا لتعزيز أمن الطاقة وتحقيق التنمية المستدامة. تعتمد عملية إنتاج البيوايثانول على مواد أولية غنية بالكربوهيدرات مثل الذرة، القمح، قصب السكر، والنفايات الزراعية، وتُختار هذه المواد بناءً على وفرتها المحلية وتركيبها الكيميائية، خصوصًا من حيث محتواها من السكريات القابلة للتحول للحيوي.

في هذا العمل، وقع اختيارنا على التمر (الغرس) كمادة أولية لإنتاج البيوايثانول، نظرًا لتوفره الواسع في بلادنا وغناه بالسكريات البسيطة مثل الغلوكوز والفركتوز، ما يجعله مناسبًا جدًا لعملية التخمر. إضافةً إلى ذلك، يُعد استغلال التمر غير القابل للتسويق وسيلة فعالة لتثمينها وتحويل النفايات إلى طاقة مفيدة. وقد ارتكز هذا العمل على مرحلتين أساسيتين مترابطتين: مرحلة استخلاص السكريات من التمر، تليها مرحلة التخمر الكحولي لهذه السكريات من أجل إنتاج البيوايثانول، وذلك في إطار تحسين الشروط التشغيلية لكلا المرحلتين بهدف رفع مردودية الإنتاج وجودته.

تم عملية إنتاج البيوايثانول عبر التخمر الكحولي، وهي عملية حيوية تقوم فيها الخمائر بتحويل السكريات إلى كحول إيثيلي وثاني أكسيد الكربون تحت ظروف محددة. وتُعد من أقدم وأبسط تقنيات إنتاج الكحول، لكنها تتطلب ضبطًا دقيقًا للشروط من أجل تحقيق مردود جيد. تتأثر هذه العملية بعدة عوامل تؤثر مباشرة على كمية الإيثانول وجودته، منها: درجة الحموضة الوسط (pH)، نوع الخميرة المستخدمة، كميتها، درجة الحرارة، ومدة التخمر. لذا فإن التحكم في هذه العوامل يُعد أساسيًا لنجاح العملية وتحقيق أفضل إنتاجية ممكنة.

ونظرًا لتعدد هذه العوامل وتداخل تأثيرها، برزت الحاجة إلى استخدام أساليب منهجية دقيقة لدراسة تأثيرها وتحسين ظروف التشغيل. من هنا، اهتمت العديد من الدراسات بتطبيق تقنيات النمذجة والتصميم التجريبي لتحليل هذه التأثيرات وتحديد الظروف المثلى للإنتاج [1]. من

بين هذه الطرق نذكر: طريقة تغيير عامل واحد في كل مرة (One-Factor-At-a-Time - OFAT) ، طريقة الشبكات العصبية الاصطناعية (Artificial Neural Network - ANN) ، وطريقة تصميم التجارب (Design of Experiments - DoE) [2]. ورغم استخدام هذه الأساليب بشكل واسع، إلا أن بعضها يتميز بعيوب واضحة، فمثلاً تُعد طريقة OFAT قليلة الدقة، في حين أن طريقة ANN معقدة من حيث التطبيق. بالمقابل، هناك طرق كمية أكثر دقة، وعادةً ما تكون أسرع في التنفيذ وأقل تكلفة مقارنة بطريقة OFAT. من الخصائص المهمة التي تميز هذه الأساليب الحديثة، قدرتها على تعديل جميع العوامل المؤثرة في عملية التحسين بشكل متزامن وفعال، مع الأخذ بعين الاعتبار التفاعلات المحتملة بين عوامل التشغيل.

تُعد طرق تحسين التصميم التجريبي DoE من بين أكثر الطرق الأكثر دقة اقل تكلفة و تتطلب عدد محدود من التجارب، تعتمد هذه الطريقة على تطبيق العديد من النماذج و ذلك حسب الحاجة مثل تصميم تاغوشي (Taguchi Design) ، التصميم العاملي الكامل (Full Factorial Design) ، المنهج المركب المركزي (Central Composite Design) ، تصميم دوهرلت (Doherty Design) ، وتصميم بوكس-بهنكن (Box-Behnken Design) من المناهج الفعالة في هذا المجال [3].

تتيح هذه الطرق إمكانية دراسة تأثير عدة عوامل في وقت واحد، تحسين تنظيم التجارب وتحديد التفاعلات الرئيسة بين المتغيرات المختارة. كما تُسهم في تقليل عدد التجارب المطلوبة والتكلفة الإجمالية، مع الحفاظ على جودة النتائج وتحقيق أداء تجريبي مُرضٍ.

وفي إطار هذا العمل، اخترنا اعتماد منهجية تصميم التجارب (DoE) باستخدام تصميم بوكس-بهنكن (Box-Behnken Design - BBD)، وذلك بهدف تحديد الشروط المثلى لعمليتي الاستخلاص والتخمير. شملت الشروط المدروسة في مرحلة الاستخلاص: النسبة بين كتلة التمر وحجم الماء (m/V)، زمن الاستخلاص ( $t_{ex}$ )، ودرجة حرارة الاستخلاص ( $T_{ex}^{\circ}$ )، بينما تم في مرحلة التخمير تم دراسة تأثير كل من: زمن التخمير، كتلة الخميرة، كتلة أنوية التمر، ودرجة حموضة الوسط (pH). وقد تم اختيار هذا التصميم لما يتميز به من كفاءة في التنبؤ بالاستجابات وتحسين المتغيرات التجريبية، مما يساهم في تحقيق أفضل مردودية للإيثانول بدقة عالية وبأقل عدد ممكن من التجارب.

تنقسم هذه المذكرة إلى جزئين رئيسيين: جزء نظري وآخر تطبيقي. يشمل الجزء النظري ثلاثة فصول، بينما يتكوّن الجزء التطبيقي من فصلين. يتناول الفصل الأول لمحة عامة حول البيوايثانول، من حيث أنواعه، مصادره، أهم خصائصه واستعمالاته. أما الفصل الثاني، فيُسلط الضوء على عملية التخمير الكحولي والعوامل المؤثرة فيها. ويستعرض الفصل الثالث أساسيات التصميم التجريبي، مع التركيز على خطة بوكس-بهنكن (BBD) المستخدمة في هذا العمل.

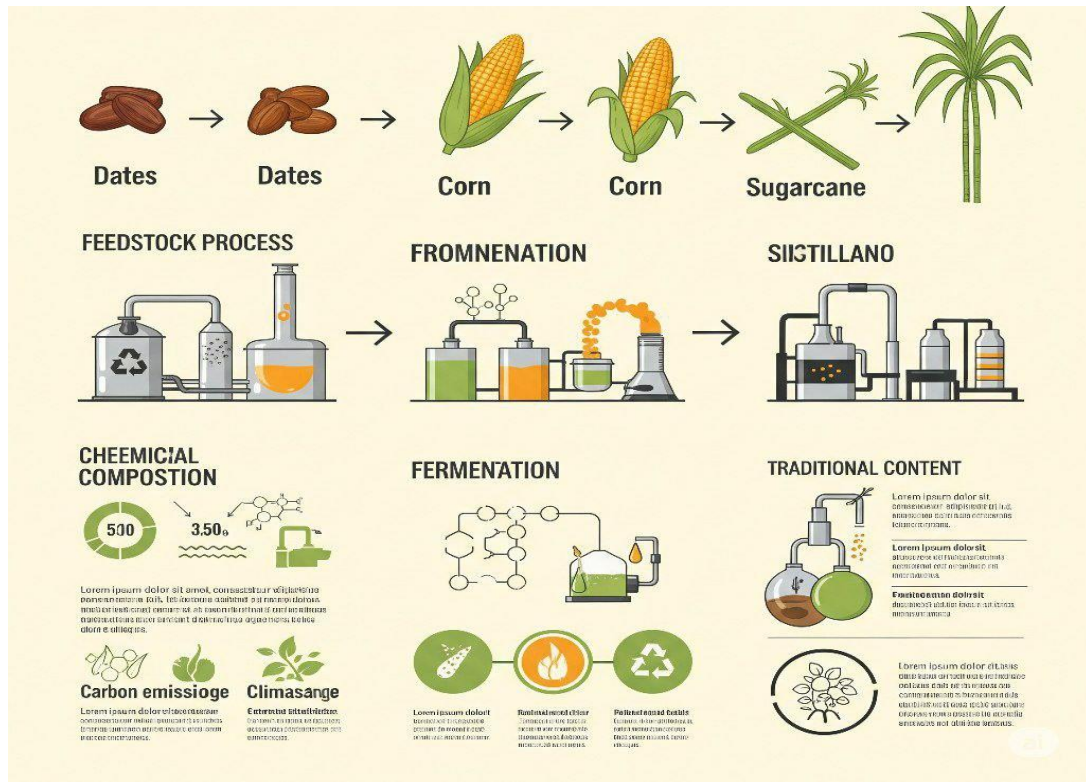
أما الجزء العملي، فيتضمن فصلاً رابعاً حُصص لعرض مختلف المراحل والتقنيات المخبرية المعتمدة في إنتاج الإيثانول انطلاقاً من التمر كإحدى أولية، يليه فصل خامس يقدم تحليلاً للنتائج التجريبية ومناقشتها بهدف تحديد الشروط المثلى لإنتاج البيوايثانول.

وختُمت المذكرة بخاتمة تضمّنت حوصلة لأهم النتائج المتوصل إليها، مع إبراز الجدوى العلمية والاقتصادية لإنتاج البيوايثانول انطلاقاً من نفايات التمر وطرح آفاق واعدة لتثمين هذه المادة المحلية مستقبلاً.

- [1] Di Blasio, G., Viscardi, M., & Beatrice, C. (2015). DoE Method for Operating Parameter Optimization of a Dual-Fuel BioEthanol/Diesel Light Duty Engine. *Journal of Fuels*, 2015(1), 674705.
- [2] Khoobakht, G., Najafi, G., Karimi, M., & Akram, A. (2016). Optimization of operating factors and blended levels of diesel, biodiesel and ethanol fuels to minimize exhaust emissions of diesel engine using response surface methodology. *Applied Thermal Engineering*, 99, 1006-1017.
- [3] Wee, S. L., Tye, C. T., & Bhatia, S. (2010). Process optimization studies for the dehydration of alcohol–water system by inorganic membrane based pervaporation separation using design of experiments (DOE). *Separation and Purification Technology*, 71(2), 192-199.

# الفصل الأول:

## عموميات حول البيوايثانول



## 1.1. مقدمة

في ظل ما يشهده العالم اليوم من أزمات بيئية واقتصادية متزايدة، يتعاظم الاهتمام بمصادر الطاقة البديلة بوصفها أحد المسارات الحيوية لتحقيق التنمية المستدامة وتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري الملوث للبيئة. ويُعد البيوإيثانول من بين أبرز هذه البدائل الواعدة، لما يتميز به من قابلية الإنتاج من مصادر عضوية متجددة ووفيرة. فالبيوإيثانول، وهو أحد أنواع الكحول الحيوي المستخرج من المواد النباتية كالسكريات والنشويات، يشهد تطورًا ملحوظًا في استخدامه كوقود صديق للبيئة. ويكمن تميزه في قدرته على الحد من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري مقارنة بالوقود التقليدي، مما يجعله خيارًا فعالًا من الناحية البيئية. وتزداد أهمية هذا الوقود الحيوي مع تطور أجياله؛ حيث بدأ إنتاجه من المحاصيل الغذائية (الجيل الأول)، ثم توسع ليشمل مصادر غير غذائية كالنفايات الزراعية والطحالب (الجيل الثاني والثالث)، ما رفع من كفاءته وجعله أكثر توافقًا مع معايير الاستدامة. ولا يقتصر دور البيوإيثانول على الجانب البيئي فحسب، بل يمتد ليشكل عنصرًا مهمًا في التحول نحو اقتصاد طاقي أكثر مرونة وأقل تكلفة، خاصة في ظل التحسينات التقنية المستمرة التي أسهمت في رفع مردوديته وخفض تكاليف إنتاجه. ومن هنا، تتأكد مكانته كأحد الحلول الرائدة في مواجهة التحديات المناخية والطاوية التي يمر بها العالم المعاصر.

## 2.1. أنواع الوقود الحيوي

الوقود الحيوي يشمل الإيثانول الحيوي، الديزل الحيوي، الغاز الحيوي، الميثانول الحيوي، ثنائي ميثيل إيثر الحيوي، إيثيل ثالثي بوتيل الإيثر الحيوي (bio-ETBE)، ميثيل ثالثي بوتيل الإيثر الحيوي (bio-MTBE)، الوقود الحيوي الاصطناعي، الهيدروجين الحيوي والزيوت النباتية النقية، وهذه هي العشرة أنواع التي ذكرتها المفوضية الأوروبية (التوجيه CE/2003/30). أما الوقودان الحيويان الرئيسيان اللذان يبدوان جاهزين للتطوير الصناعي، هما الإيثانول والأستر الميثيلي لزيت النبات أو الديزل الحيوي. [1]

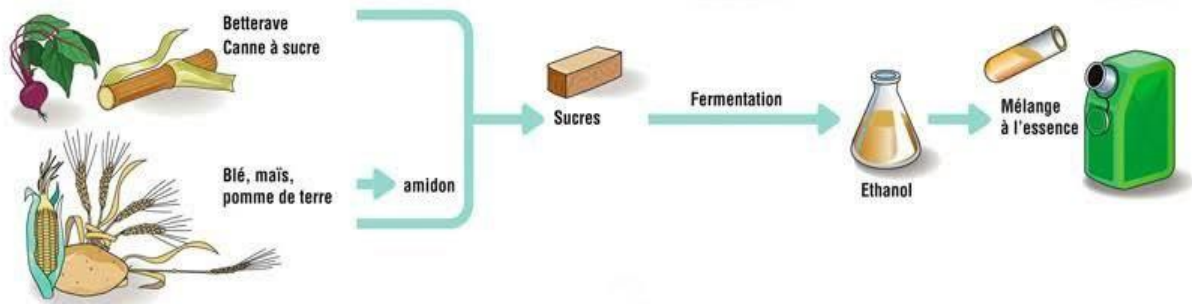
## 3.&amp;I الأجيال المختلفة للوقود الحيوي

## 1.3.I. الجيل الاول

أ. الديزل الحيوي (Biodiesel) : يتم إنتاجه من النباتات الزيتية مثل الكولزا (اللفت الزيتي)، عباد الشمس، فول الصويا أو من الدهون الحيوانية أو الزيوت الغذائية المستخدمة. عملية الإنتاج تتم من خلال الأستر، وهي تحويل الدهون إلى أسترات ميثيلية للأحماض الدهنية (EMAG) باستخدام تفاعل كيميائي يُسمى التبادل الإستيري، ويتم ذلك بوجود مادة محفزة. باستخدام هذه التقنية، يمكن إنتاج 970 كغ من الديزل الحيوي و108 كغ من الجلسرين من كل طن واحد من الزيت و110 كغ من الميثانول. [2]

ب. الإيثانول الحيوي (Bioethanol) : يتم إنتاج الإيثانول الحيوي من النباتات السكرية مثل قصب السكر أو الحبوب. ويُستخدم عادة كإضافة للوقود الأحفوري بطريقتين رئيسيتين: الاستخدام المنهجي (المنتظم): حيث يُضاف إلى البنزين الممتاز SP95-E10 بنسبة تصل إلى 10% حجمًا، أو إلى SP95 و SP98 بنسبة تصل إلى 5% حجمًا، والاستخدام بتركيز عالٍ: يتم استخدامه في وقود الإيثانول الممتاز E85، الذي يحتوي على نسبة تتراوح بين 65% و85% من الإيثانول حجمًا. تم توفير هذا النوع من الوقود في محطات الخدمة منذ عام

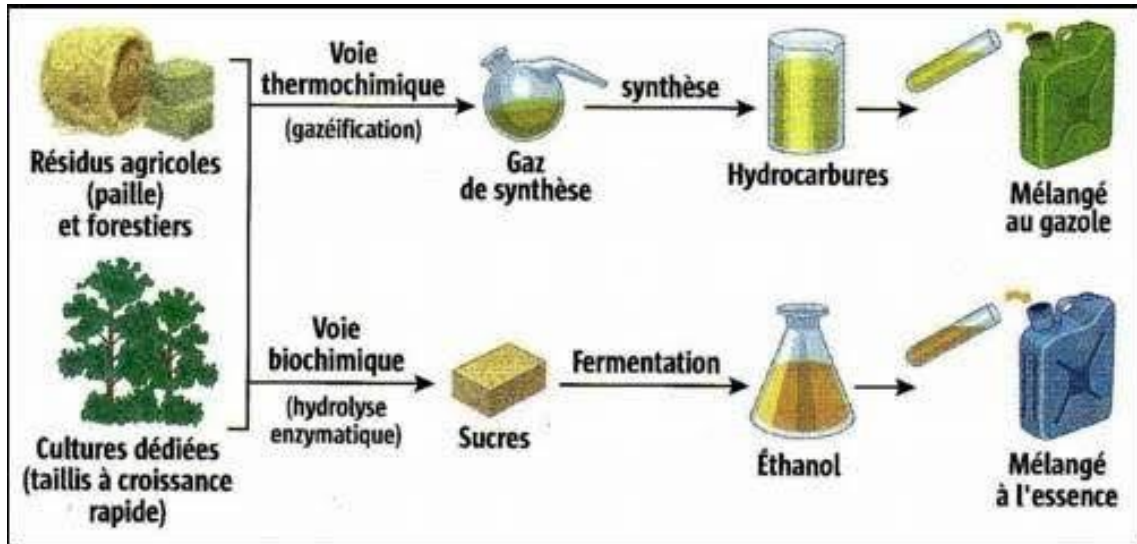
2007، وهو مخصص للمركبات المجهزة للعمل بالوقود المرن، المعروفة باسم "المركبات ذات الوقود القابل للتعديل". وتعتبر البرازيل والولايات المتحدة من الدول الرائدة في تطوير وقود الإيثانول الحيوي. [2]



الشكل I.1: إنتاج الإيثانول الحيوي من الجيل الأول

### 2.3.I. الجيل الثاني

هو نوع من الوقود يتم تصنيعه من مواد طبيعية مثل بقايا النباتات والأخشاب التي تُعتبر نفايات زراعية وغابية، بدلاً من استخدام المحاصيل الغذائية مثل الذرة لإنتاج الوقود. يتم استخدام مخلفات مثل القش، الخشب أو نباتات تزرع خصيصاً لهذا الغرض، مثل النباتات سريعة النمو. الهدف من هذه الطريقة هو تحسين إنتاج الطاقة من خلال استغلال النبات بالكامل، بما في ذلك الأجزاء التي لا تُستخدم عادةً. إضافةً إلى ذلك، تساعد هذه التقنية في تقليل الاعتماد على الأراضي الزراعية المخصصة للغذاء وتوسيع الخيارات لتشمل محاصيل غير غذائية. يُعد هذا النوع من الوقود الأكثر كفاءة والأقل تأثيراً على البيئة مقارنةً بالجيل الأول الذي يعتمد على المحاصيل الغذائية. [3]

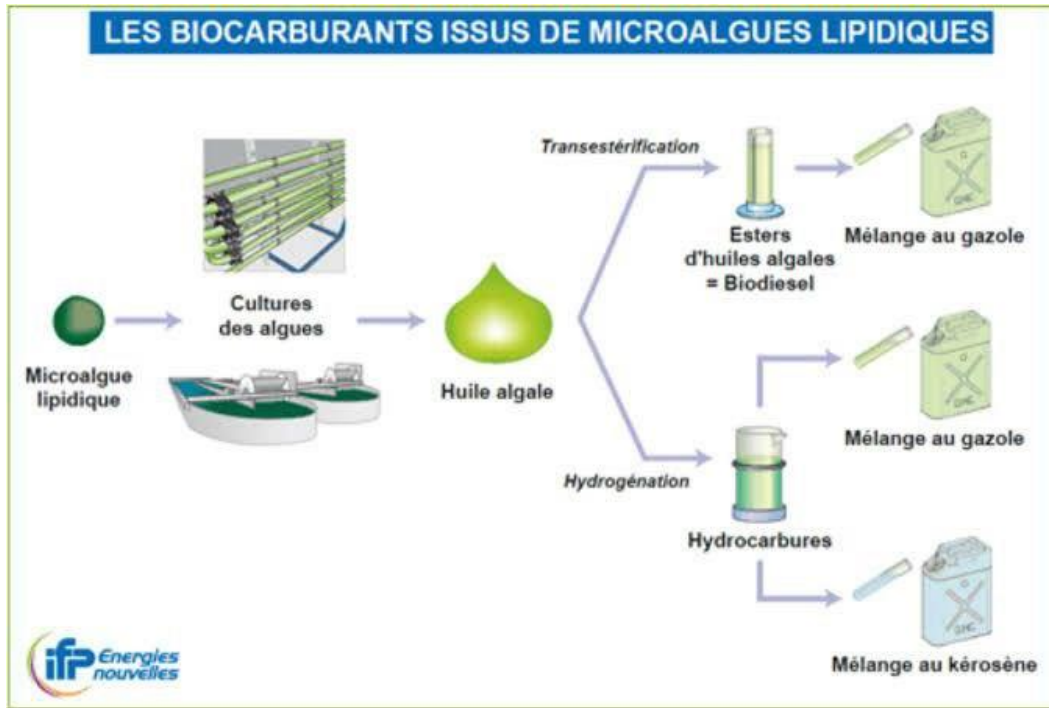


الشكل I.2: إنتاج الإيثانول الحيوي من الجيل الثاني

3.3.I. الجيل الثالث

يتمثل في استخدام الكائنات الدقيقة مثل الطحالب، هذه الكائنات قادرة على تخزين الأحماض الدهنية مما يسمح بتحقيق إنتاجية أعلى بـ 30 مرة مقارنة بالزيوت النباتية التقليدية. يمكن تحويل هذه الأحماض الدهنية إلى بيوديزيل، بالإضافة إلى ذلك تحتوي بعض أنواع الطحالب على سكريات يمكن تحويلها إلى بيوايثانول عن طريق التخمير، كما يمكن استخدام الطحالب أيضًا لإنتاج البيوجاز والبيوهيدروجين.

[3]



الشكل 3.I: إنتاج الإيثانول الحيوي من الجيل الثالث

4.I. فوائد الوقود الحيوي

- ✚ **التكلفة:** الوقود الحيوي الحالي أقل تكلفة بشكل ملحوظ مقارنة بالبنزين والوقود الأحفوري الآخر.
- ✚ **الموارد:** يُعد النفط مورداً محدوداً، بينما يمكن تصنيع الوقود الحيوي من مجموعة واسعة من المواد، بما في ذلك نفايات المحاصيل، السباد وغيرها من المنتجات الثانوية.
- ✚ **التجدد:** يستغرق إنتاج الوقود الأحفوري آلاف السنين، بينما يتم تجديد المواد الأولية للوقود الحيوي بسرعة أكبر بكثير.
- ✚ **الأمان:** من خلال تقليل الاعتماد على مصادر الطاقة الأجنبية، يمكن للدول حماية مواردها الطاقوية والتحرر من التأثيرات الخارجية.
- ✚ **التحفيز الاقتصادي:** نظرًا لأن الوقود الحيوي يُنتج محليًا، يمكن لمصانع إنتاجه خلق فرص عمل جديدة في المناطق الريفية، كما أن إنتاج الوقود الحيوي سيزيد الطلب على المحاصيل المستخدمة في تصنيعه، مما يحفز الاقتصاد الزراعي.

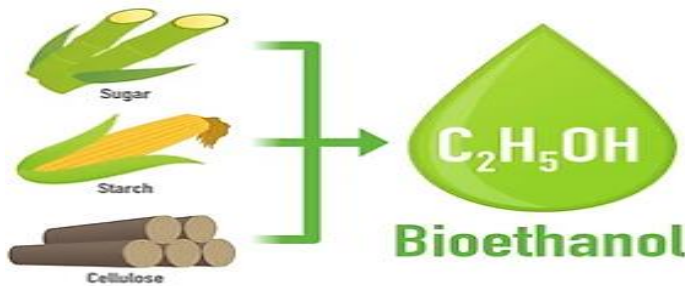
✚ **التحلل الحيوي:** الوقود الحيوي قابل للتحلل بسهولة وأقل خطورة عند التعامل معه مقارنة بالوقود التقليدي.

✚ **انبعاثات الكربون المنخفضة:** عند حرق الوقود الحيوي، ينتج كميات أقل بكثير من الكربون والسموم، مما يجعله بديلاً أكثر

أماناً للحفاظ على جودة الهواء. [4]

### 5.I. البيوإيثانول

الإيثانول يُعرف أيضًا بالكحول الإيثيلي، صيغته الجزيئية هي  $CH_3CH_2OH$ . الإيثانول الحيوي أو الإيثانول ذو المصدر البيولوجي، هو إيثانول يتم إنتاجه عن طريق التخمير باستخدام الكتلة الحيوية التي تعتبر مادة عضوية ناتجة عن الكائنات الحية، وهذا المركب العضوي هو نفسه الموجود في المشروبات الكحولية. حاليًا، يُعد الإيثانول أكثر أنواع الوقود الحيوي السائل استخدامًا على مستوى العالم ويتم إنتاجه بشكل رئيسي عبر التخمير الميكروبي للسكريات أو النشويات المستخلصة من مجموعة متنوعة من المواد الأولية، بما في ذلك قصب السكر، الذرة، الحبوب، المخلفات الزراعية وروث الماشية...، عندما تكون السكريات موجودة على شكل متعددات السكاريد (Polysaccharides)، يتم استخدام عملية التحلل المائي (سواء الحمضي أو الأنزيمي) عادةً لإزالة اللجين وتكوين سكريات قابلة للتخمير قبل إجراء العملية. باستخدام الكائنات الحية الدقيقة (مثل الخميرة)، يتم تحويل السكريات المتحللة (مثل الجلوكوز) إلى إيثانول (إيثانول حيوي) خلال عملية التخمير. [6,5]



الشكل I.4: إنتاج الإيثانول الحيوي من المصادر النباتية

### 1.5.I. تركيب الإيثانول الحيوي

يحتوي الإيثانول الحيوي على نسبة 35% من الأكسجين، مما يساهم في تقليل انبعاث المواد الجسيمية، كما أن استخدام الإيثانول الحيوي يؤدي إلى خفض كمية ثاني أكسيد الكربون ( $CO_2$ ) المنبعثة بنسبة 7% مقارنة بالبنزين. يتميز الإيثانول الحيوي بمؤشر أوكتان مرتفع جدًا، مما يمنحه مقاومة كبيرة ضد الانفجارات الناتجة عن الاشتعال المبكر، وهو ما يضمن أداءً عاليًا للمحرك، لا سيما من حيث القوة التي ينتجها، ويلعب الإيثانول الحيوي دورًا مشابهًا للمركبات المشتقة من الرصاص التي كانت تُضاف إلى البنزين سابقًا لتحقيق هذا الأداء. [7]

### 2.5.I. الخصائص الفيزيوكيميائية

#### 1.2.5.I. الخصائص الفيزيائية

✚ الإيثانول سائل متحرك، عديم اللون، متطاير، ذو رائحة لطيفة نسبيًا يمكن اكتشافها عند تركيز 84 جزءًا في المليون.

قابل للمزج مع الماء، ولكن عند مزجه مع البنزين فإنه يحدث تمدد للحجم الكلي الناتج عن هذا الخلط، قابل للامتزاج أيضًا مع معظم المذيبات الشائعة. وهو مذيب جيد للدهون ويذيب العديد من المواد البلاستيكية.

تركيز خليط الماء/الإيثانول هو النسبة بين حجم الكحول المطلق الموجود في الخليط وحجم الخليط عند درجة حرارة 15 درجة مئوية، ويُعبّر عنه كنسبة مئوية من حيث الحجم.

يمكن تسويق الإيثانول في شكل خالٍ من الماء (إيثانول بنسبة 100% يُعرف أيضًا بالكحول المطلق) أو بتراكيز مختلفة في الماء، وأهمها 95%، وللاستخدامات المطهرة 70%.

الإيثانول المشوّه، المعروف أيضًا باسم الكحول المحترق، هو إيثانول مذاب فيه مواد مختلفة لجعله غير صالح للاستهلاك. في فرنسا، يجب أن يحتوي الكحول المُدسّس وفقًا للإجراء العام على 3.5% من الميثيلين-ريجي (وهو خليط معقد يعطي طعمًا ورائحة غير مستحسّنين، ويتم الحصول عليه عن طريق الكربنة الحشبية ويحتوي على حوالي 65% من الميثانول، والكيبتونات والشوائب الناتجة عن التفاعل الحراري)، و1% من 2-بروبانول.

### 2.2.5.I. الخصائص الكيميائية

في الظروف العادية، الإيثانول مادة مستقرة، يتميز بالخصائص العامة للكحولات الأولية مثل: تفاعلات الأكسدة، نزع الهيدروجين، نزع الماء والأسترة.

يمكن أن يتفاعل بقوة مع المؤكسدات القوية مثل: حمض النيتريك، حمض البيركلوريك، البيركلورات، البيروكسيدات، البرمنجنات وثلاثي أكسيد الكروم.

التفاعل مع المعادن القلوية يؤدي إلى انبعاث الهيدروجين، وقد يكون التفاعل عنيفًا ما لم يُنقذ في غياب الهواء لتجنب تكون خليط انفجاري من الهواء والهيدروجين، بينما معظم المعادن الشائعة الأخرى تكون غير متأثرة بالإيثانول. [8]

### 3.5.I. استخدامات الإيثانول الحيوي

كـمـذـيـب: يُستخدم في صناعة الدهانات، المواد البلاستيكية، المواد اللاصقة، مستحضرات التجميل والصناعات الدوائية.

كـمـادـة خام: يُستخدم لإنتاج العديد من المركبات مثل: حمض الأسيتيك، أكريلات الإيثيل، أسيتات الإيثيل، إيثرات الجليكول، إيثيلامين، الإيثيلين و إيثرات الأكسيد، خاصةً إيثر-إيثيل-ثالثي-بوتيل.

**مكوّن في الوقود:** يُعدّ "الإيثانول الحيوي"، وهو إيثانول يتم الحصول عليه من مواد خام نباتية، وقودًا يمكن استخدامه بمفرده أو مع البنزين. وتختلف نسب الإيثانول في خلطات البنزين-الإيثانول بين 5% و95% حسب الدولة. في فرنسا، تُسوّق الأنواع التالية من الوقود:

- **SP95:** متوفر منذ عام 2000، يحتوي على نسبة تصل إلى 5% من الإيثانول (حجمًا).
- **SP95-E10:** متوفر منذ عام 2009، يحتوي على نسبة تصل إلى 10% من الإيثانول (حجمًا).
- **Super Ethanol E85:** متوفر منذ عام 2007، يحتوي على نسبة تتراوح بين 65% و85% من الإيثانول (حجمًا).

**مكّطهر ووسيلة حماية:** يُستخدم كعامل مضاد للميكروبات (بيوسايد) وفقًا للوائح التنظيمية.

**مكوّن في المشروبات الكحولية.** [8]

#### 4.5.I. الخطوات اللازمة لإنتاج الإيثانول انطلاقًا من الليجنوسليلوز

يعتبر الليجنوسلولوز مادة معقدة التركيب، تتطلب عملية تحويلها إلى إيثانول حيوي مجموعة من الخطوات المتسلسلة.

##### 1/ المعالجة الأولية

يتكون الليجنوسلولوز بشكل أساسي من بوليمرات من السليلوز (Cellulose) والهيميسليلوز (Hemicellulose) محاطة بطبقة من اللجنين (La lignine)، بنسب متفاوتة تبعاً لنوع المادة الخام. تهدف هذه العملية إلى تكسير بنية الليجنوسلولوز المعقدة، وإزالة طبقة اللجنين الخارجية، مما يسهل الوصول إلى السليلوز والهيميسليلوز، ويزيد من مساحة السطح المتاحة للتفاعلات الكيميائية اللاحقة. تستخدم مجموعة متنوعة من الطرق الفيزيائية، الكيميائية والبيولوجية، وقد يتم دمج عدة طرق لتحقيق أفضل النتائج. اختيار الطريقة المناسبة يعتمد بشكل كبير على نوع المادة الخام. [9]

##### 2/ التحلل السكري

يتم خلال هذه المرحلة تحويل السليلوز والهيميسليلوز إلى سكريات بسيطة يمكن تخميرها. النواتج الرئيسية لهذه العملية هي السكريات السداسية (مثل الجلوكوز والغالكتوز والمانوز) والسكريات الخماسية (مثل الزيلوز والأرابينوز). تستخدم الطرق الكيميائية والإنزيمية لتحقيق هذه العملية. [9]

##### 3/ إزالة السموم

تستخدم الأحماض في مرحلتها المعالجة الأولية والتحلل السكري مما يؤدي إلى تكوين مواد كيميائية تعمل كمثبطات لعملية التخمير، تشمل هذه المواد الأحماض الضعيفة، الفورانات (Les furanes) والمركبات الفينولية (Les composés phénoliques). يجب إزالة هذه المواد قبل عملية التخمير لضمان كفاءة إنتاج الإيثانول. [10]

## 4/ اختيار الكائن الدقيق

يقوم الكائن الدقيق بتحويل السكريات إلى إيثانول. ويجب أن يكون الكائن الدقيق قادراً على استغلال السكريات السداسية والخماسية، وأن يتميز بكفاءة عالية في إنتاج الإيثانول، وأن يتحمل وجود المشبطات، كمثل لذلك: الخميرة *Saccharomyces cerevisiae* وهي أحد الكائنات الدقيقة الشائعة المستخدمة في هذه العملية. [9]

## 5/ تركيب ووظيفة وسط النمو

يوفر وسط النمو العناصر الغذائية والأكسجين اللازمين لنمو الكائن الدقيق، حيث تختلف تركيبة وسط النمو باختلاف نوع الكائن الدقيق المستخدم. [9]

## 6/ استخلاص الإيثانول

**الهدف:** فصل الإيثانول الناتج عن باقي مكونات الوسط.

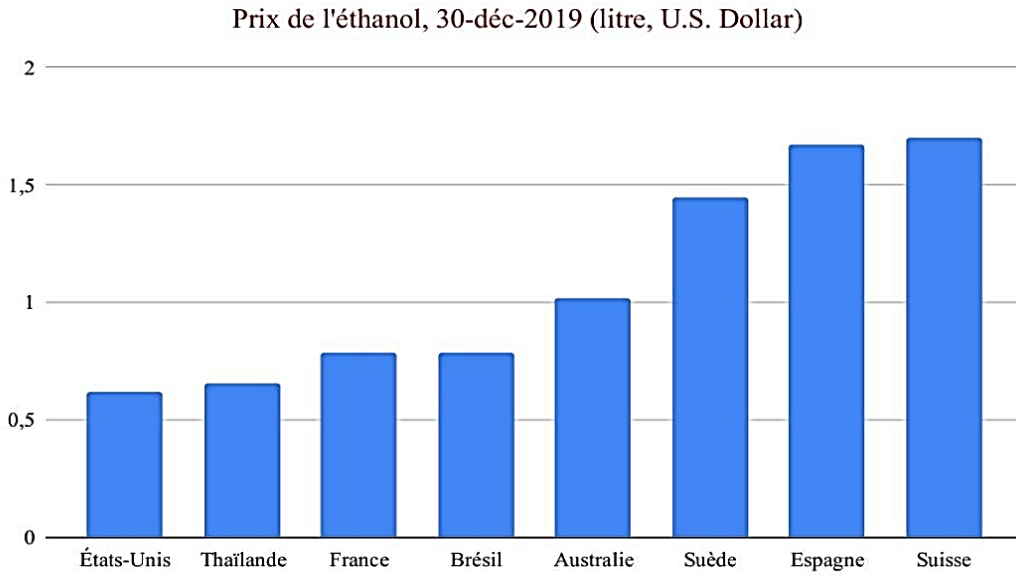
**الطريقة:** يتم ذلك عن طريق التقطير، حيث يتم تسخين الوسط إلى درجة حرارة غليان الإيثانول، مما يؤدي إلى تبخره وتكثيفه

في صورة نقيّة. [9]

## 5.5.I. تكاليف إنتاج الإيثانول الحيوي بحسب العملية المستخدمة

تتأثر تكاليف إنتاج الإيثانول الحيوي بعدة عوامل، من بينها تكاليف الاستثمار وتكاليف المواد الخام (التي تتأثر بدورها بتكاليف الزراعة والإنتاجية والعرض والطلب في السوق)، تكاليف التشغيل والصيانة وكفاءة العملية الإنتاجية ومع ذلك، فإن التكاليف الإجمالية لإنتاج الإيثانول الحيوي التقليدي (الجيل الأول) تهيمن عليها تكاليف المواد الخام، أي المحاصيل الغذائية. ونظرًا لأن كفاءة تحويل هذه المحاصيل إلى وقود حيوي تقترب من أقصاها، فإن فرص خفض التكاليف في هذا النوع من الوقود الحيوي محدودة. يشكل الإيثانول الحيوي التقليدي المنتج من النشا (مثل الذرة والقمح) والسكريات (مثل قصب السكر) أكبر مساهمة في الإنتاج الإجمالي للوقود الحيوي، وبالتالي يمثل أكبر مساهمة متجددة في قطاع النقل. وفي عام 2019، تضاعف إنتاج الإيثانول بنسبة 1.31 مقارنة بعام 2016، حيث بلغ الإنتاج العالمي 154 مليار لتر من الإيثانول الحيوي. [8]

وفي عام 2019، تراوحت تكلفة إنتاج لتر واحد من الإيثانول التقليدي المنتج من الذرة في الولايات المتحدة بين 0.61 و0.70 دولار أمريكي، بينما تراوحت تكلفة إنتاج لتر واحد من الإيثانول البرازيلي المنتج من قصب السكر بين 0.70 و0.78 دولار أمريكي. يوضح الشكل الاختلافات في أسعار لتر الإيثانول بين مختلف البلدان.



Source : globalpetrolprices.com (2019)

### الشكل 5.1: سعر لتر الإيثانول الحيوي في عدة دول

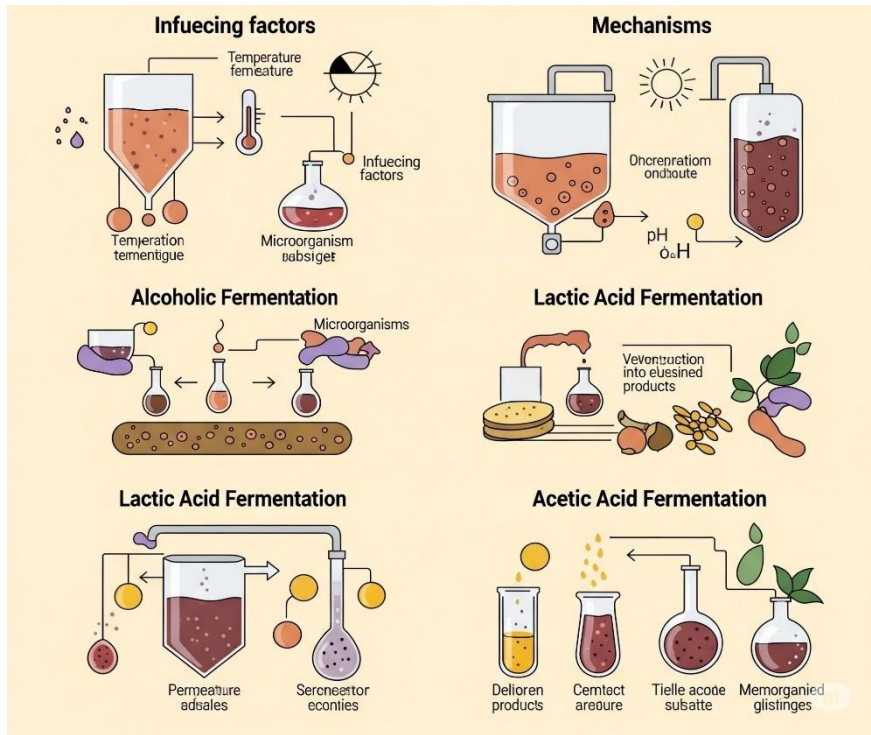
بما أن عمليات إنتاج الإيثانول الحيوي المتقدم (المنتج من المواد الخام الليجنوسلولوزية) أكثر تعقيداً، فإن تكلفته أعلى مقارنة بالإيثانول الحيوي التقليدي، حيث تتراوح بين 1.04 و1.45 دولار أمريكي لكل لتر. ومع ذلك، يُتوقع أن تنخفض تكاليف إنتاجه مع زيادة الاستثمارات في البحث والتطوير واكتساب المشاريع التجارية المتقدمة مزيداً من الخبرة، لتصل إلى 0.70 دولار أمريكي لكل لتر في حال بلغت تكلفة المواد الخام الحفافة 30 دولاراً أمريكياً للطن، وإلى 1.0 دولار أمريكي لكل لتر إذا بلغت تكلفة المواد الخام الحفافة 100 دولار أمريكي للطن، وذلك

خلال العقد القادم. [11]

- [1] Perrin.R, Scharff.J.P (2005). Les Biocarburants En France Et En Europe ; Chimie industrielle ; Lyon
- [2] Oucif K., Mohammed T. (2017). Mise En Valeur Des Dérivés De Dattes De La Région d'Oued Souf Pour La Production De Bioéthanol. Thèse De Doctorat. Université Kasdi merbah Ouargla. Soutenue Le : 16/05/2017 :1-81p.
- [3] Boulal A. (2017). Contribution A L'étude De La Microflore Des Dattes Conservées Par Des Méthodes Traditionnelles (Btana), Et Valorisation Des Dattes De Faible Valeur Marchande Soutenue : Thèse De Doctorat. Université d'Oran 1 Ahmed Ben Bella. Soutenue Le 28 Juin 2017 : Pp, 1-106
- [4] Hudebine, D. (2014). Biofuels production: routes, processes and technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews 30: 431–448.
- [5] Escobar, J. C., Lora, E. S., Venturini, O. J., Yáñez, E. E., Castillo, E. F. and Almazan, O. (2009). Biofuels: Environment, technology and food security, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13(6): 1275–1287.
- [6] Champagne, P. (2008). Chapter 9 - Biomass, in T. M. Letcher (ed.), Future Energy, Elsevier, Oxford, pp. 151–170.
- [7] SADI Meriem. (2012). Le Bioéthanol : Une Véritable Alternative Pour Une Energie Propre Division Bioénergie Et Environnemen
- [8] International Energy Agency (IEA). (2019). Renewables 2019: Analysis and forecasts to 2024. IEA, Paris Institut National De Recherche Et De Sécurité (INRS), Éthanol, (Fiche Toxicologique N°48)
- [9] Kumar Singh Et Gaurav Chaudhary. (2017). Advances In Biofeedstocks And Biofuels, Volume Two: Production Technologies For Biofuel
- [10] Zha Y., J.A. Westerhuis, B. Muilwijk, K.M. Overkamp, B.M. Nijmeijer, L. Coulier, A.K. Smilde, And P.J. Punt. (2014). "Identifying Inhibitory Compounds In Lignocellulosic Biomass Hydrolysates Using An Exometabolomics Approach", BMC Biotechnology, Vol.
- [11] IRENA (2013). Roadmap 2030: A Renewable Energy Roadmap. International Renewable Energy Agency, Abu Dhab.

# الفصل الثاني:

## عمليات التخمير



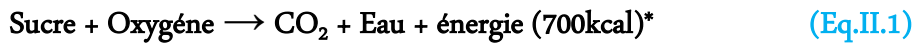
1.II. المقدمة

يُعد التخمير من العمليات البيولوجية الأساسية التي تُستخدم على نطاق واسع في مختلف الصناعات، لا سيما في إنتاج الإيثانول الحيوي بوصفه بديلاً متجددًا وصديقًا للبيئة عن الوقود الأحفوري. وتُعد الخميرة *Saccharomyces cerevisiae* من أكثر الكائنات الحية الدقيقة استخدامًا في هذا المجال، نظرًا لقدرتها الفعالة على تحويل السكريات البسيطة إلى إيثانول وثاني أكسيد الكربون تحت ظروف لا هوائية.

ونظرًا لما تحتويه الخمور من نسب عالية من السكريات القابلة للتخمير، برزت كخيار واعد في مجال إنتاج الوقود الحيوي، خاصة في الدول ذات الإنتاج الوفير لهذه المادة الخام. غير أن نجاح عملية التخمير لا يعتمد فقط على نوع المادة الأولية، بل يتأثر أيضًا بجملة من العوامل التقنية والحيوية مثل: درجة الحموضة، مدة التخمير، سرعة التحريك، تركيز الأكسجين، نشاط الماء، تركيز السكر وتراكم الإيثانول في الوسط. في هذا الفصل، سيتم التطرق بالتفصيل إلى هذه العوامل، مع توضيح تأثير كل منها على كفاءة عملية التخمير. بالإضافة إلى الإشارة إلى أنواع التخمير المختلفة والآليات المستخدمة في هذه العملية.

II. 2. الأنواع المختلفة لعملية التخمير

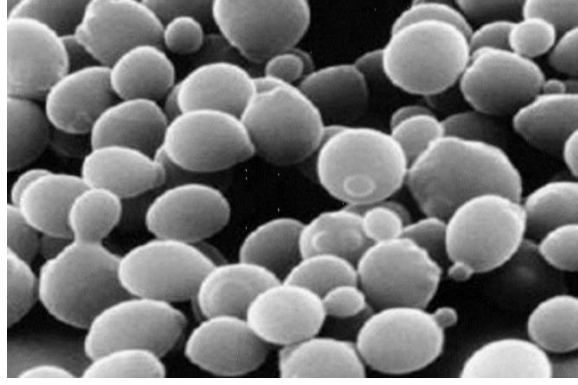
توجد أنواع مختلفة من التخمير تصنف بناءً على النواتج النهائية للعملية والكائنات الحية الدقيقة المستخدمة ومن أشهر هذه الأنواع التخمير الكحولي، التخمير اللبني والتخمير الخلي. خلال عملية التخمير الكحولي تحدث العديد من التغيرات، من أبرزها: انطلاق غاز ثاني أكسيد الكربون، ارتفاع في درجة الحرارة والتغير في اللون، تغير في الرائحة والطعم، انخفاض في الكثافة (نتيجة تحول السكر إلى كحول) وزيادة في الحجم. في صناعة الخبز، تستخدم خميرة الخبز التي تستطيع العيش في وجود أو غياب الأكسجين. تتكاثر هذه الخميرة بسرعة في وجود الجلوكوز، ولكنها لا تنتج الكحول. [1]



وفي حالة عدم وجود الأكسجين، يتم تحويل جزء كبير من السكر إلى إيثانول، مما يقلل من كمية الطاقة المتحررة. ويتم ملاحظة انخفاض في معدل تكاثر الخلايا.



الطاقة المتحررة من الأوكسدة الكلية لجزء واحد من الغلوكوز.



الشكل II.1: الخميرة *S. Cerevisiae* تحت المجهر الإلكتروني الماسح.

## 2.II. الأليات المستعملة للتخمير

### 1.2.II. التخمير الدفعي (غير المستمر Batch Mode)

تُعرف عمليات التخمير غير المستمرة أيضًا بـ "الأنظمة المغلقة"، حيث تتم إضافة كلِّ من الركيزة والكائنات الحية الدقيقة المنتجة إلى المفاعل الحيوي عند الزمن صفر، ولا يتم سحبها حتى تكتمل عملية التخمير. وبالتالي فإن تراكيزها لا تكون تحت السيطرة المباشرة، وإنما تتغير بمرور الوقت وفقًا لاستهلاكها المرتبط بنمو الكائنات الحية الخلوية. عادةً ما يتم الحفاظ على استقرار قيم الأس الهيدروجيني (pH)، تركيز الأوكسجين المذاب ودرجة الحرارة أثناء تشغيل المفاعل. [2]

### 2.2.II. النمط الشبه مستمر (Fed Batch)

يشير نمط Fed-Batch (المشتق من الفعل الإنجليزي to feed)، الذي يعني "تغذية" إلى نظام يتم فيه إضافة الركائز في ظروف معقمة، وهو نظام شبه مفتوح يزداد فيه حجم الوسط السائل داخل المفاعل الحيوي مع الإضافة المعقمة للمزرعة. تُعد مزارع Fed-Batch الأكثر استخدامًا صناعيًا والأكثر إنتاجية، حيث توفر مردودية أفضل. [2]

### 3.2.II. النمط المستمر (Mode Continu)

تتم زراعة هذه المزارع في مفاعلات من نوع "الشموستات" (Chemostat)، وهي الأبسط من حيث التشغيل في النظام المستقر، حيث تكون معدلات التدفق الداخلة مساوية لمعدلات التدفق الخارجة لكل وحدة زمنية. يُعد التخمير المستمر نظام تشغيل مفتوح، حيث تتم الإضافة المستمرة والتفريغ المستمر للمحلول داخل النظام. يتم إدخال كل من الكائنات الحية الدقيقة والركائز إلى المفاعل الحيوي بشكل متجانس ومعقم. [2]

### 2.II.4. المفاعل الحيوي مع إعادة تدوير الخلايا

تسمح بعض العمليات بتنفيذ تخمير مستمر مع إعادة تدوير الكتلة الحيوية، مما يتيح الحصول على كتلة حيوية أكبر من خلال إعادة

تغذية المفاعل الحيوي بالكائنات الحية الدقيقة المنتجة. [3]

### 3.II. العوامل المؤثرة في التخمير

#### 1.3.II. درجة الحرارة

يتأثر معدل نمو الكائنات الحية الدقيقة بشكل مباشر بدرجة الحرارة [4]. إذ تصحح درجات الحرارة المرتفعة، التي لا تلائم النمو الخلوي، عامل إجهاد لهذه الكائنات [5]. وقد تحدد المدى المثالي لدرجة الحرارة في عمليات التخمير بين  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  و  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . بالنسبة لخلايا *Saccharomyces cerevisiae*، فإن درجة الحرارة المثلى للخلايا الحرة تقترب من  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ، في حين أن الخلايا المثبتة تتمتع بدرجة حرارة مثلى أعلى قليلاً، نظرًا لقدرتها على نقل الحرارة من سطح الجزئيات إلى داخل الخلايا. [6] بالإضافة إلى ذلك، فإن الإنزيمات التي تتحكم في النشاط الميكروبي وعمليات التخمير حساسة للحرارة المرتفعة، فقد تؤدي إلى تغيير بنيتها الثلاثية وتعطيل نشاطها [7]. لذلك، يتم ضبط درجة الحرارة بدقة طوال عملية التخمير لضمان كفاءتها

#### 2.3.II. درجة الحموضة

يتأثر إنتاج الإيثانول بدرجة حموضة وسط الزراعة، إذ تُعتبر عاملاً رئيسياً يؤثر على انتشار البكتيريا الملوثة، نمو الخمائر ومعدل التخمير، فضلاً عن تكوين المنتجات الثانوية. كما أن نفاذية بعض العناصر الغذائية الأساسية إلى الخلايا تتأثر بتركيز أيونات الهيدروجين ( $\text{H}^{+}$ ) في وسط التخمير. [8,9] وفي عملية التخمير لإنتاج الإيثانول باستخدام *S. Cerevisiae* يكون المجال الأمثل لدرجة حموضة الوسط بين 4 و 5.

[10]

#### 3.3.II. مدة التخمير

تؤثر مدة التخمير على نمو الكائنات الحية الدقيقة. فإذا كانت الفترة قصيرة فإنها تؤدي إلى كفاءة منخفضة في التخمير بسبب ضعف نمو الكائنات الحية الدقيقة. ومن جهة أخرى، فإن إطالة مدة التخمير أكثر من اللازم قد يكون له تأثير سام على النمو الميكروبي، خاصة في نظام التخمير غير المستمر، وذلك نتيجة التركيز العالي للإيثانول في وسط التخمير. يمكن تحقيق تخمير كامل عند درجات حرارة منخفضة باستخدام مدة تخمير أطول، إلا أن ذلك يؤدي إلى انخفاض مردود الإيثانول. [8,9]

#### 4.3.II. التحريك

تتحكم سرعة التحريك في نقل العناصر الغذائية من وسط التخمير إلى داخل الخلايا، كما تؤثر على طرح الإيثانول من الخلايا إلى وسط التخمير. فكلما كانت شدة التحريك أكبر، زادت كمية الإيثانول المنتجة. بالإضافة إلى ذلك، يؤدي التحريك إلى زيادة استهلاك السكر وتقليل التأثير المثبط للإيثانول على الخلايا. وفي التجارب المخبرية، يُستخدم نطاق سرعة تحريك شائع في عمليات التخمير يتراوح بين 150 و 200 دورة في الدقيقة. [11]

### 5.3.II. ثاني أكسيد الكربون

تتأثر ذوبانية ثاني أكسيد الكربون ( $CO_2$ ) بدرجة الحموضة (pH) ودرجة الحرارة. حيث يمكن أن يذوب في الوسط السائل على شكل حمض الكربونيك ( $H_2CO_3$ )، والذي يتفكك إلى أيونات البيكربونات ( $HCO_3^-$ )، الكربونات ( $CO_3^{2-}$ ) والهيدروجين ( $H^+$ ) وفقاً للتفاعل التالي:



تؤثر نسبة ثاني أكسيد الكربون في وسط التخمر على الأيض الميكروبي من خلال تثبيط النمو والإنتاج. يفسر هذا التأثير من خلال عدة آليات، بما فيها تغيير تركيب الغشاء الخلوي، خفض درجة الحموضة داخل الخلية، تثبيط الإنزيمات، تثبيط النشاط الأيضي وإحداث خلل في توازن الأيونات داخل الخلية [12].

### 6.3.II. الإيثانول المحرر في الوسط

تمت الإشارة إلى أن الإيثانول المحرر في وسط التخمر يصبح ساماً للخمائر وقد يؤثر سلباً على وظائفها الحيوية. إذ يمكنه تغيير البنية النشطة لبعض الإنزيمات مثل الهكسوكيناز، وذلك من خلال إحداث تغييرات هيكلية في الغشاء البلازمي. يؤدي هذا التغيير إلى زيادة نفاذية الغشاء للأيونات، مما يسبب اختلالاً في توازن الشحنات عبر الغشاء الخلوي. ونتيجة لذلك، فإن الإيثانول الناتج عن عملية التخمر يُبطئ من امتصاص الخلايا للنيتروجين، مما قد يؤثر على كفاءة النمو والتخمر. [13]

### 7.3.II. نشاط الماء

لا تستطيع معظم السلالات الميكروبية النمو عند نشاط ماء أقل من 0,90، ولكن بعض السلالات قادرة على تحمل ضغوط تناضحية عالية، حيث يمكنها العيش عند نشاط ماء يقارب 0,6. تعرف هذه الخمائر باسم "الخمائر المتحملة للجفاف" (Xérotolérantes)، وذلك لقدرتها على إبطاء نشاطها الأيضي للتكيف مع الظروف البيئية القاسية. [11]

### 8.3.II. محتوى الأكسجين

يُعتبر تركيز الأكسجين الغازي في وسط التخمر عاملاً أساسياً يؤثر بشكل مباشر على النشاط الأيضي للبكتيريا. وقد أثبتت عدة دراسات أن انخفاض مستويات الأكسجين في الوسط يمكن أن يؤدي إلى زيادة ملحوظة في قدرة البكتيريا على تحمل الإيثانول. [12]

### 9.3.II. تركيز السكر

إن زيادة تركيز السكر إلى مستوى معين يسمح برفع معدل تحويلها للإيثانول. ومع ذلك، فإن استخدام تركيز مفرط من السكر يؤدي إلى استقرار معدل التخمر، حيث تصل العملية إلى مرحلة التشبع، أي عندما يتجاوز تركيز السكر المستخدم قدرة الخلايا الميكروبية على امتصاصه.

بشكل عام، يتم تحقيق أقصى مردود لإنتاج الإيثانول عند استخدام تركيز سكري يبلغ 150 غ/ل. كما تُعد التركيزات الأولية للسكر عاملاً مهمًا في إنتاج الإيثانول، حيث يمكن تحقيق إنتاجية ومردود مرتفعين في عملية التخمير غير المستمر عند استخدام تركيز أولي مرتفع من السكر. لكن هذه الطريقة تتطلب وقت تخمير أطول وتؤدي إلى زيادة تكلفة استخلاص الإيثانول. [9,8]

- [1] Burillard Lucile, Vincent Daumas, Margot Glaz, Lolita Kouyoumdjian, Simon Lobrot, Diane Logier, Noémie Mallot.(2016). Clémence Marchand, Les fermentations alimentaires, Frédéric Borges.
- [2] HUSSENET, C. (2017). Instrumentation, modélisation et automatisation de fermenteurs levuriers à destination œnologique. Thèse : Génie des procédés. Paris : Université Paris-Saclay, 201 p.
- [3] Chillet Pascal. (2011). Opérations unitaires en génie biologique. La fermentation. Centre régionale de documentation pédagogique d'Aquitaine.
- [4] CharoENCHAI, C., Fleet, G. H. and Henschke, P. A. (1998). Effects of Temperature, pH, and Sugar Concentration on the Growth Rates and Cell Biomass of Wine Yeasts, *American Journal of Enology and Viticulture* 49(3): 283–288.
- [5] Cot, M., Loret, M.-O., François, J. and Benbadis, L. (2007). Physiological behaviour of *Saccharomyces cerevisiae* in aerated fed-batch fermentation for high level production of bioethanol, *FEMS Yeast Research* 7(1): 22–32.
- [6] Liu, R. and Shen, F. (2008). Impacts of main factors on bioethanol fermentation from stalk juice of sweet sorghum by immobilized *Saccharomyces cerevisiae* (CICC 1308), *Bioresource Technology* 99(4): 847–854.
- [7] Phisalaphong, M., Srirattana, N. and Tanthapanichakoon, W. (2006). Mathematical modeling to investigate temperature effect on kinetic parameters of ethanol fermentation, *Biochemical Engineering Journal* 28(1): 36–43.
- [8] Zabeed, H., Faruq, G., Sahu, J. N., Azirun, M. S., Hashim, R. and Nasrulhaq Boyce, A. (2014). Bioethanol Production from Fermentable Sugar Juice, *The Scientific World Journal* 2014: 111.
- [9] MohdAzhar, S. H., Abdulla, R., Jambo, S. A., Marbawi, H., Gansau, J. A., Mohd Faik, A. A. and Rodrigues, K. F. (2017). Yeasts in sustainable bioethanol production : A review, *Biochemistry and Biophysics Reports* 10 : 52–61.
- [10] Lin, Y., Zhang, W., Li, C., Sakakibara, K., Tanaka, S. and Kong, H. (2012). Factors affecting ethanol fermentation using *Saccharomyces cerevisiae* BY4742, *Biomass and Bioenergy* 47: 395–401.
- [11] Razafindralambo Faniry, Brickaville. (2008). Etude De Faisabilité Technico Economique De L'installation D'une Unité De Production d'Ethanol D'ignames (*Dioscorea alata* ) A Promotion Ilo (2003-2008), 2008, Université D'Antananarivo Ecole Supérieure Des Sciences Agronomiques Département Des Industries Agricoles Et Alimentaires.

- [12] Chniti Sofien. (2015). Optimisation de la bio production d'éthanol par valorisation des refus de l'industrie de conditionnement des dattes. Autre. Université Rennes 1. Français. ffNNT : 2015REN1S118ff. fftel-01558761.
- [13] DACCACHE, A. (2019). Production de bioéthanol à partir de déchets de dattes. Thèse : Génie des procédés. Algérie : Université de Boumerdès, 123 p.



## 1.III. مقدمة

يُعد تصميم التجارب (Design of Experiments - DOE) منهجية فعالة في البحث العلمي تهدف إلى دراسة وتحسين العمليات من خلال تنظيم التجارب وتحليل العوامل المؤثرة على النتائج. في سياق إنتاج الإيثانول من التمر، تتيح هذه التصميمات إمكانية تحديد الظروف المثلى لتحقيق أعلى مردودية بأقل التكاليف، مما يجعلها أداة أساسية في مجال الهندسة الكيميائية والصناعات الحيوية. يستعرض هذا الفصل الأسس النظرية لتصميم التجارب، بدءًا من خلفيتها التاريخية وصولاً إلى تطبيقاتها العملية. كما يناقش المفاهيم المرتبطة بالعوامل المؤثرة، الاستجابة، التفاعلات، وأساليب النمذجة الرياضية، مع التركيز على طرق تقييم النموذج التجريبي باستخدام تحليل التباين (ANOVA) وأدوات الإحصاء المختلفة. يهدف هذا التحليل إلى تحسين كفاءة إنتاج الإيثانول عبر فهم أعمق للعلاقات بين المتغيرات التجريبية، مما يسمح بتحسين العملية الإنتاجية وتوجيهها نحو تحقيق نتائج أكثر دقة وموثوقية.

## 2.III. تصميم التجارب (Design of Experiments - DoE)

هو أحد فروع الإحصاء التطبيقي الذي يهتم بوضع منهجيات دقيقة لتخطيط، وتنفيذ، وتحليل، وتفسير التجارب العلمية، بهدف دراسة تأثير العوامل المختلفة على متغير أو مجموعة من المتغيرات التابعة. يُعد DoE أداة فعالة تُمكن الباحث من جمع بيانات موثوقة وتحليلها بطريقة منهجية، بما يسمح باستخلاص استنتاجات موضوعية وتحسين العمليات أو النماذج قيد الدراسة. تُستخدم هذه المنهجية في مجالات متعددة مثل الصناعة، الزراعة، الطب، والهندسة، لتحديد العوامل المؤثرة وتحسين جودة النتائج. [1]

## 3.III. نبذة تاريخية عن تصميم التجارب

يُعد تصميم التجارب (Design of Experiments - DoE) من الركائز الأساسية في المنهجية العلمية الحديثة، وقد شهد تطوراً ملحوظاً خلال القرن العشرين، لا سيما بفضل إسهامات العالم الإحصائي رونالد أ. فيشر (R.A. Fisher) في عشرينيات وثلاثينيات القرن الماضي، وخلال عمله في محطة روثامستد للأبحاث الزراعية بالملكة المتحدة، واجه فيشر صعوبات كبيرة في تفسير نتائج تجريبية غير مُحكمة التصميم. دفعه ذلك إلى تطوير مفاهيم إحصائية جديدة، شكلت لاحقاً أساس تصميم التجارب، مثل: العشوائية (Randomization)، التكرار (Replication)، الحظر (Blocking)، والتصاميم العاملية (Factorial Designs). نُوج هذا العمل بنشر كتابه الأول، Statistical Methods for Research Workers عام 1925، ثم كتابه الثاني Experiments of The Design عام 1935، واللدان أسساً المنظومة المفاهيمية والإجرائية لتصميم التجارب كما تُمارس اليوم.

ساهمت هذه المبادئ في تمكين الباحثين من ضبط المتغيرات المربكة وتحسين دقة النتائج، وانتقلت من المجال الزراعي إلى التطبيقات الصناعية والطبية، كما استُخدمت ضمن برامج تحسين الجودة مثل ستة سيغما (Six Sigma).

ولا يزال تأثير فيشر قائماً حتى اليوم، حيث تُعد مبادئه الحجر الأساس في البحوث العلمية التطبيقية، خاصةً فيما يتعلق بتقنيات تحليل التباين (ANOVA) وتقدير الاحتمالية القصوى (Maximum Likelihood Estimation)، اللتين تُستخدمان على نطاق واسع في تحليل

البيانات التجريبية. [2]

### 4.III. مجال تطبيق تصميم التجارب

تُستخدم منهجية تصميم التجارب (DoE) على نطاق واسع في العديد من المجالات العلمية والصناعية، نظرًا لقدرتها على تحليل تأثير العوامل المختلفة وتحسين جودة النتائج. ومن أبرز مجالات تطبيقها:

✚ **المجال الصناعي:** تُستخدم لتطوير وتحسين جودة المنتجات والعمليات الإنتاجية، لا سيما ضمن برامج الجودة مثل "Six Sigma".

✚ **الهندسة الكيميائية:** تُطبق لتحسين أداء العمليات الكيميائية وفهم تأثير المتغيرات التشغيلية على نواتج التفاعل.

✚ **العلوم البيولوجية والطبية:** تعتمد عليها الدراسات السريرية والتجارب المخبرية لتحليل فعالية الأدوية وفهم الاستجابات البيولوجية.

✚ **القطاع الزراعي:** تُستخدم لتقييم تأثير الظروف البيئية والعوامل الزراعية على الإنتاجية وجودة المحاصيل.

✚ **المجال الأكاديمي والبحثي:** تُعد أداة أساسية في تصميم الدراسات واختبار الفرضيات بطريقة منهجية وتحليل البيانات الناتجة بشكل

إحصائي دقيق. [3]

### 5.III. عملية اكتساب المعرفة

زيادة المعارف تعني إيجاد إجابة لسؤال مطروح. لذا تبدأ العملية بطرح سؤال أو عدة أسئلة (انظر الشكل 1.III). على سبيل المثال، إذا رغبتنا في معرفة تأثير سداد معين على مردودية القمح في قطعة أرض، يمكننا طرح الأسئلة التالية، وهي بطبيعة الحال غير مقتصرة على هذه الأسئلة فقط:

✚ "هل يمكننا الحصول على 10 قناطير إضافية من القمح للهكتار الواحد بزيادة كمية السداد؟"

✚ "ما هو تأثير الأمطار على فعالية السداد؟"

✚ "هل ستظل جودة القمح جيدة إذا استخدمت هذا السداد؟"

✚ "كمية السداد التي يجب استخدامها للحصول على أكبر كمية ممكنة من القمح لكل هكتار؟"

تعمل هذه الأسئلة على تحديد المشكلة التي يجب حلها، وترسم الخطوط العامة للأعمال الواجب تنفيذها. لذا من المهم للغاية أن تكون الأسئلة المطروحة مرتبطة فعلاً بالمشكلة الأساسية. وبالطبع قبل الشروع في إجراء التجارب، من الحكمة التأكد أولاً مما إذا كانت المعلومات المطلوبة متوفرة مسبقاً في مصادر أخرى. [4]

ولهذا الغرض، يتم إجراء جرد للمعارف المتوفرة، سواء عن طريق مراجعة ما كُتب سابقاً من دراسات وكتب ومقالات، أو باستشارة خبراء، أو من خلال حسابات نظرية، أو بأي وسيلة أخرى تهدف إلى الإجابة على الأسئلة المطروحة دون الحاجة إلى تجارب. بعد هذه المرحلة الاستقصائية، قد تُجاب الأسئلة المطروحة كلياً، مما يعني انتفاء المشكلة. أما في حال بقاء بعض الأسئلة بلا إجابة، أو تغير صياغتها، يصبح من الضروري عندئذٍ تنفيذ تجارب من أجل الحصول على الأجوبة الشاملة المرجوة.

ويُعد هذا العمل التحضيري جزءاً من مهام الباحث التجريبي، ولن نُفصّل فيه كثيراً، لأنه ليس هو المرحلة من عملية الاكتساب التي نرغب في تركيز تفكيرنا وجهودنا على تحسينها.

بعد تصفية الأسئلة لتبقى فقط تلك التي لا إجابة آتية لها، يكون من الضروري إجراء تجارب. لكن كيف يمكن اختيار هذه التجارب بحيث:

✚ نصل بسرعة إلى أفضل النتائج الممكنة.

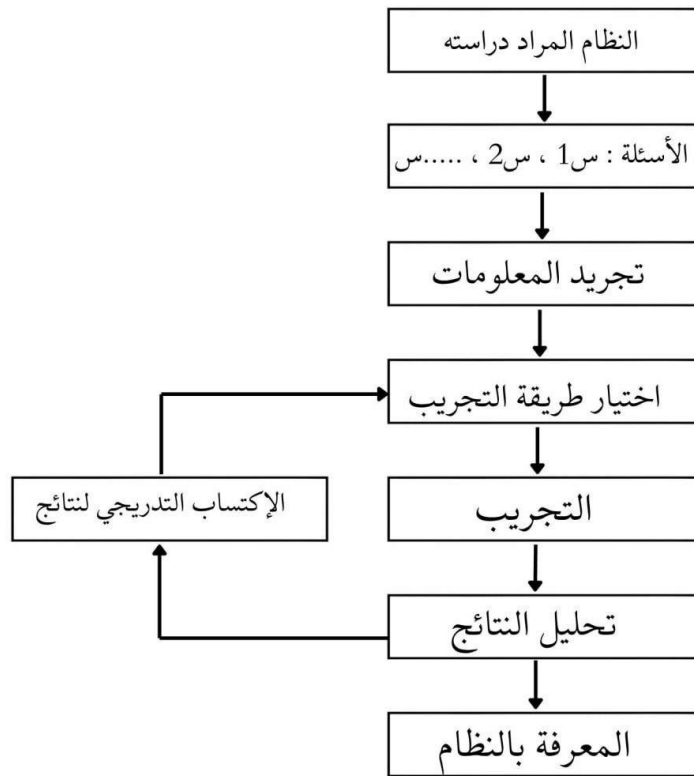
✚ نتفادى تنفيذ تجارب غير مجدية.

✚ نحصل على أعلى دقة ممكنة في النتائج.

✚ نضمن تقدماً مؤكداً.

✚ نُقيم نمذجة دقيقة للظاهرة المدروسة.

✚ نكتشف الحل الأمثل. [4]



الشكل. III. 1: مخطط عملية اكتساب المعارف.

الجوانب الثلاثة الأساسية في عملية اكتساب المعارف هي كما يلي:

✚ اختيار منهجية التجريب.

✚ تحليل النتائج.

✚ الاكتساب التدريجي للمعرفة.

فلئلا نغفل أكثر تفصيلاً على هذه الجوانب الثلاثة، مع العلم أن التجارب تُنظم بطريقة تُسهّل استغلال النتائج وتتيح اكتساب المعارف ذات الأهمية بشكل تدريجي. [4]

### 1.5.III. اختيار طريقة التجريب

يجب أن تُسهّل طريقة التجريب المختارة تفسير النتائج. كما ينبغي أن تُقلّل من عدد التجارب المطلوبة دون أن تُضحي بجودة النتائج. توفر نظرية تصاميم التجارب الشروط التي تُمكن من الحصول على أعلى درجة ممكنة من الدقة بأقل عدد من التجارب. وبذلك نُحقق أعلى مستوى من الكفاءة بأدنى عدد من التجارب، وبالتالي، بأقل تكلفة ممكنة. [4]

### 2.5.III. تحليل النتائج

يُصبح تحليل نتائج التجارب أسهل بفضل الاختيار المسبق والمدرّس للتجارب. فإذا تم التحضير الجيد للتجارب، ستكون النتائج سهلة التفسير وغنية بالدلالات والمعارف. وبفضل الحواسيب والبرمجيات، أصبح إعداد تصاميم التجارب والقيام بالحسابات اللازمة لتفسيرها أمراً في غاية البساطة. كما تتيح هذه الأدوات تمثيلات بيانية فعالة تُبرز النتائج بشكل واضح وجذاب، مما يُحسّن من فهم الظواهر المدروسة. [4]

### 3.5.III. الاكتساب التدريجي للمعرفة

إن المُجرّب الذي يشرع في دراسة معينة لا يكون على دراية مسبقة بالنتائج، ولذلك من الحكمة أن يتقدّم في العمل بشكل تدريجي، بما يُتيح له إعادة توجيه التجارب استناداً إلى النتائج الأولية. تُساعد المحاولة الأولى في توجيه التجارب لاحقاً نحو الجوانب ذات الأهمية الفعلية في الدراسة، والتخلي عن المسارات التي لا تؤدي إلى نتائج مفيدة. وتُفضي السلسلة الأولى من التجارب إلى استنتاجات مؤقتة، وبناءً على هذه الاستنتاجات، تُطلق سلسلة جديدة من التجارب. ويُستخدم مجموع نتائج السلسلتين معاً لرسم صورة دقيقة للنتائج المتعلقة بموضوع الدراسة. بهذه الطريقة، يجمع المُجرّب فقط النتائج التي يحتاجها، ويتوقّف عن التجريب بمجرد أن يبلّغ الهدف المنشود من دراسته. [4]

### 6.III. دراسة ظاهرة

غالباً ما تتمثل دراسة ظاهرة ما في الاهتمام بكمية معينة، مثل استهلاك الوقود لسيارة، أو تكلفة إنتاج منتج كيميائي، أو مردودية القمح في قطعة أرض زراعية. هذه الكمية – سواء كانت استهلاكاً، أو سعراً، أو مردودية – تعتمد على عدد كبير من المتغيرات. فاستهلاك السيارة، على سبيل المثال، يتوقف على سرعة المركبة، وقوة المحرك، وطريقة القيادة، واتجاه الرياح وشدها، وضغط هواء الإطارات، ووجود أو عدم

وجود صندوق أمتعة، وعدد الأشخاص المنقولين، وعلامة السيارة التجارية، وغيرها من العوامل. أما تكلفة المنتج الكيميائي فتتعلق بجودة المواد الأولية، وكفاءة وحدات الإنتاج، والمواصفات المطلوبة، وظروف التصنيع، إلى غير ذلك. وينطبق الأمر نفسه على مردودية القمح، إذ تعتمد على طبيعة التربة، وكمية السواد المضاف، والتعرض لأشعة الشمس، والمناخ، ونوع القمح المزروع، وغيرها من العوامل. بصيغة رياضية، يمكن التعبير عن الكمية ذات الاهتمام - والتي سَنُطلق عليها لاحقاً اسم الاستجابة - بالرمز  $y$ ، باعتبارها دالة تعتمد على عدة متغيرات  $x_i$  (وسنُسمى هذه المتغيرات لاحقاً عوامل أيضاً)، فنكتب:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) \quad (\text{Eq.III.1})$$

وبالتالي، فإن دراسة الظاهرة تكمن في تحديد الدالة  $f()$  التي تربط الاستجابة  $y$  بمختلف العوامل  $x_1, x_2, \dots, x_k$ . ولتعميق هذا التناول، ينبغي تقديم بعض المفاهيم الخاصة والمصطلحات التقنية المرتبطة بتصاميم التجارب. [4]

### 7.III. مصطلحات

تُسمى الكمية محل الاهتمام، والتي يُشار إليها عادة بالرمز  $y$ ، الاستجابة. أما المتغيرات القادرة على التأثير في هذه الاستجابة، فيُطلق عليها اسم العوامل. وعليه، نتحدث عن العوامل التي تؤثر على استجابة معينة. يُستعمل مصطلح العامل والاستجابة بشكل شائع وموحد في مجال تصميم التجارب. [4]

#### 1.7.III. الأنواع المختلفة للعوامل

يعتمد بناء المخططات التجريبية وتفسير نتائجها إلى حد كبير على أنواع العوامل التي يتم التعامل معها في الدراسة. ويمكن التمييز بين عدّة أنواع من العوامل، نذكر منها:

العوامل المستمرة، العوامل المتقطعة، العوامل القابلة للترتيب، والعوامل البوليانية (المنطقية). [4]

##### 1.1.7.III. عوامل مستمرة

الضغط مثال على عامل مستمر. ففي مجال معين من الضغط، يمكن اختيار أي قيمة ممكنة ضمن هذا المجال. وينطبق الأمر نفسه على الطول، أو التركيز، أو درجة الحرارة. وعليه، فإن القيم التي تأخذها العوامل المستمرة تُعبّر عنها بأعداد مستمرة. [4]

##### 2.1.7.III. عوامل متقطعة

على النقيض من ذلك، لا يمكن للعوامل المتقطعة أن تأخذ إلا قيماً محددة. وهذه القيم ليست بالضرورة عددية؛ إذ يمكن تمثيل العامل المتقطع باسم، أو حرف، أو خاصية، أو حتى عدد لا يحمل قيمة عددية بحد ذاته، بل يُستخدم كمرجع. على سبيل المثال، يمكن أن نكون بصدد دراسة ألوان منتج معين: الأزرق، الأحمر، والأصفر، وهذه تُعدّ عوامل متقطعة. [4]

##### 3.1.7.III. عوامل قابلة للترتيب

هي عوامل متقطعة يمكن ترتيبها منطقياً. مثلاً: كبير، متوسط، صغير، أو الأول، الثاني، الثالث، الرابع. [4]

## III.4.1.7. عوامل بوليانية (منطقية)

العوامل البوليانية هي عوامل متقطعة لا يمكن أن تأخذ إلا قيمتين اثنتين، مثل: مرتفع أو منخفض، مفتوح أو مغلق، أبيض أو أسود... إلخ. غالباً ما تكون الحدود الفاصلة بين هذه الأنواع من العوامل غير واضحة تماماً.

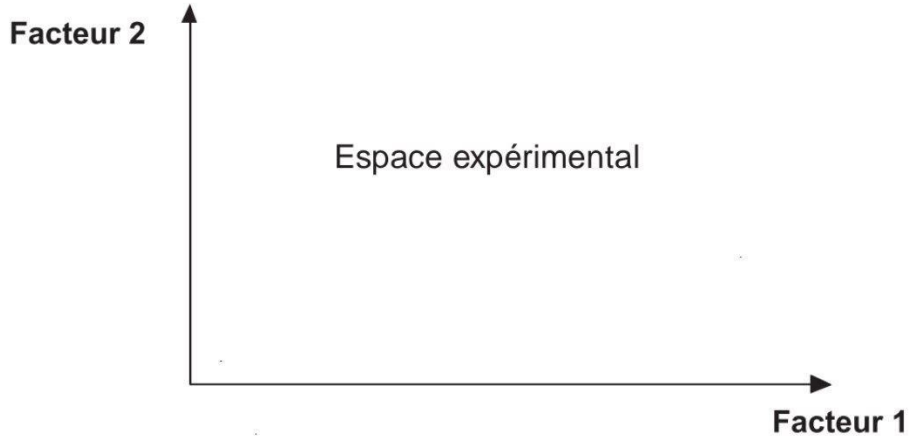
**مثلاً:** اللون، وهو عامل يبدو متقطعاً، يمكن تحويله إلى كمية قابلة للترتيب أو حتى مستمرة إذا ما أُدخل مفهوم الطول الموجي. كما يمكن تحويل عامل مستمر كالسرعة إلى عامل قابل للترتيب أو متقطع: سريع وبطيء، أو سرعة A وسرعة B وهذا التنوع لا يُعدّ عيباً، بل يُمثل مرونة إضافية يمكن أن يستفيد منها المجرّب في مرحلة تفسير النتائج. إذ يمكن، بحسب اختيار نوع المتغير، إبراز جانب معين من جوانب الدراسة بشكل أوضح. كما أن تغيير نوع المتغيرات يُعدّ وسيلة لتكثيف الاستجابة مع هدف الدراسة. على سبيل المثال:

إذا كانت لدينا بيانات عن أعمار أفراد مجموعة سكانية، وكنا بصدد حساب العمر المتوسط، فسيختار متغير "العمر" كمتغير مستمر. أما إذا أردنا حساب نسبة الأشخاص في أعمار معينة، فسيُعتبر "العمر" متغيراً قابل للترتيب، بحيث تُقسم إلى فئات حسب حدود الأعمار: الشباب، المراهقون، البالغون، وكبار السن.

أما إذا أردنا معرفة نسبة الشباب الذين تقل أعمارهم عن 18 سنة، فسيُعتبر "العمر" متغيراً بولياني: أقل من 18 سنة، وأكثر من 18 سنة. إن فهم مخططات التجارب يعتمد على مفهوم أساسي هو الحيز التجريبي للكميات المدروسة. وسنقوم بتفصيل هذا المفهوم الجوهري، مع التركيز على العوامل المستمرة نظراً لشيوع استخدامها. [4]

## III.2.7. الفضاء التجريبي (espace expérimental)

لتقديم الفضاء التجريبي، سنستخدم فضاءً ثنائي الأبعاد، مما يُسهّل التمثيلات البيانية. ومن السهل بعد ذلك تعميم المفاهيم المقدمّة إلى فضاءات متعددة الأبعاد. يمكن تمثيل عامل مستمر بمحور مدرّج وموجّه. وإذا وُجد عامل مستمر ثانٍ، فإنه يُمثل هو أيضاً بمحور مدرّج وموجّه. يُوضَع هذا المحور الثاني بشكل عمودي على المحور الأول، فنحصل بذلك على نظام إحداثي ديكارتي يُعرّف فضاءً إقليدياً ثنائي الأبعاد. يُطلق على هذا الفضاء اسم "الفضاء التجريبي" (انظر الشكل 2.III). يشمل الفضاء التجريبي جميع النقاط الواقعة في المستوى "العامل 1 × العامل 2"، ويمثل كلّ منها تجربة. [4]

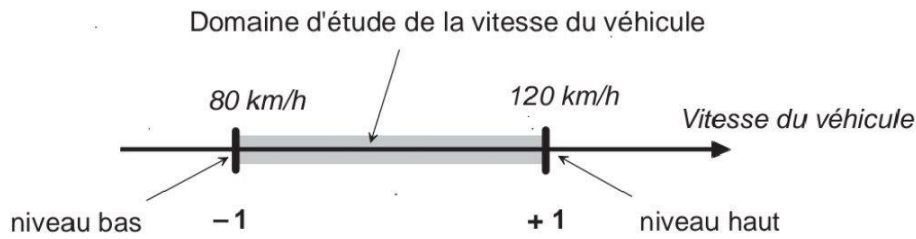


**الشكل.III.2:** يُمثّل كل عامل بمحور مدرّج وموجّه. المحاور الخاصة بالعوامل متعامدة فيما بينها. الفضاء المُعرّف بهذه الطريقة يُمثّل الفضاء التجريبي.

إذا وُجد عامل ثالث، فإنه يُمثّل هو أيضاً بمحور موجّه ومدرّج، ويُوضَع عمودياً على المحورين الأولين. وابتداءً من وجود أربعة عوامل، تتبع نفس المنهج، غير أنه لم يعد من الممكن اعتماد تمثيل هندسي، بل يجب اللجوء إلى تمثيل رياضي صرف للفضاء التجريبي، والذي يُعدّ حجماً فائقاً (Hypervolume) في أربعة أبعاد. [4]

### 3.7.III. مجال العامل (domaine d'un facteur)

القيمة المعطاة لعامل من أجل إجراء تجربة تُسمّى "مستوى"



**الشكل.III.3:** يتكوّن مجال تغيّر السرعة من جميع السرعات المحصورة بين 80 و120 كم/سا. يُمثّل المستوى المنخفض للعامل بالرمز -1، ويُمثّل المستوى المرتفع بالرمز +1.

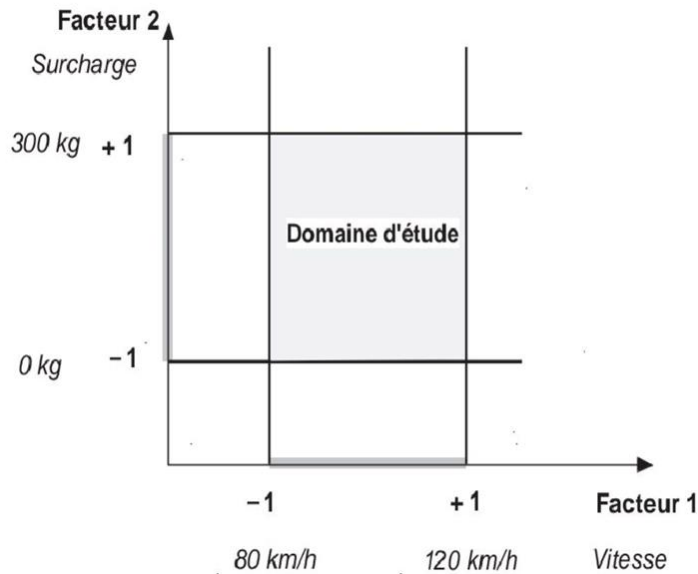
عند دراسة تأثير عامل ما، عادةً ما تُحدّد تغيراته ضمن حدّين: الحد الأدنى يُسمّى "المستوى المنخفض"، والحدّ الأقصى يُسمّى "المستوى المرتفع". فعلى سبيل المثال، إذا تمت دراسة تأثير سرعة المركبة على استهلاك الوقود، فإنّ السرعة قد تتراوح بين 80 و120 كم/س، حيث تُعدّ سرعة 80 كم/س المستوى المنخفض، و120 كم/س المستوى المرتفع. ويُحدّد المحرّب هذين المستويين بناءً على خصائص الدراسة. يُطلق على مجموعة القيم التي يمكن أن يأخذها العامل بين هذين المستويين اسم "مجال تغير العامل" أو ببساطة "مجال العامل".

في حال وجود عدة عوامل، فإن لكل عامل مجال تغير خاص به. ومن أجل توحيد التمثيل بين مختلف العوامل، جرت العادة على التعبير عن المستويات المنخفضة بالرمز -1، والمستويات المرتفعة بالرمز +1. على هذا الأساس، تُعتبر سرعة 80 كم/س هي المستوى -1، وسرعة 120 كم/س هي المستوى +1. داخل مجال عامل مستمر، تكون جميع القيم ممكنة نظرياً، ويمكن اختيار مستويين أو ثلاثة أو أكثر وفقاً لحاجة الدراسة. فعلى سبيل المثال، إذا كان الهدف هو بناء نموذج من الدرجة الثانية، فيُختار ثلاث أو أربع مستويات، أي ثلاث أو أربع سرعات مختلفة. [4]

### III.4.7. مجال الدراسة

في الممارسة العملية، يقوم المجرّب باختيار جزء من الفضاء التجريبي من أجل إجراء دراسته. تُسمى هذه المنطقة الخاصة من الفضاء التجريبي مجال الدراسة (أنظر الشكل III.4). يُحدّد هذا المجال من خلال المستويات العليا والمستويات الدنيا لجميع العوامل، وقد تُفرض عليه أيضاً بعض القيود بين العوامل.

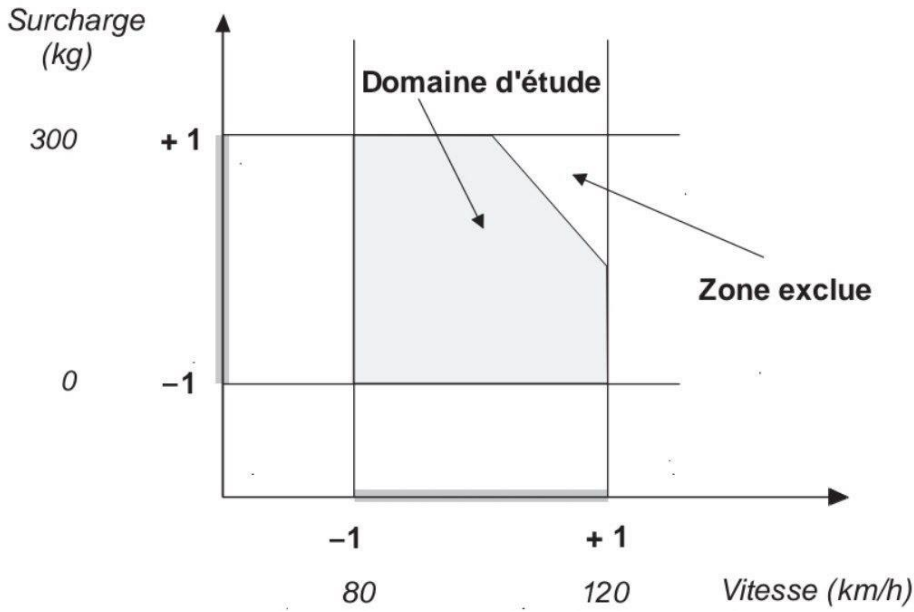
لنأخذ مثلاً العامل الثاني وهو الحمولة الزائدة للمركبة، وتُعرّف على أنها كل كتلة إضافية فوق كتلة المركبة والسائق. يمكن أن يكون المستوى المنخفض للحمولة الزائدة 0 كغ، والمستوى المرتفع 300 كغ، على سبيل المثال. فإذا لم تكن هناك قيود، فإن مجال الدراسة يتمثل في جميع النقاط التي تكون فيها الحمولة الزائدة محصورة بين 0 و300 كغ، والسرعات محصورة بين 80 و120 كم/س. [4]



الشكل III.4: يُعرّف مجال الدراسة على أنه اتحاد مجالات العوامل المختلفة (في هذه الحالة، لا توجد قيود).

قد تُفرض قيود على مجال الدراسة. على سبيل المثال، قد يكون من غير الممكن بلوغ سرعة 120 كم/س مع حمولة زائدة مرتفعة جداً.

يوضح الشكل 5.III تقليصاً محتملاً لمجال الدراسة الأصلي، حيث تُستثنى منطقة معينة من هذا المجال من التجارب. [4]



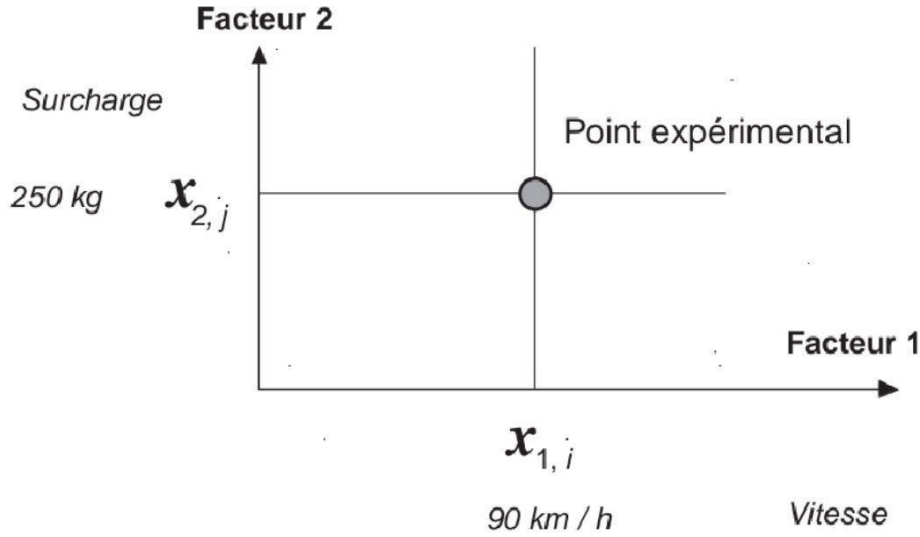
الشكل 5.III: يُعرّف مجال الدراسة على أنه اتحاد مجالات العوامل المختلفة (في هذه الحالة، لا توجد قيود).

### 8.III. النقاط التجريبية

في فضاء ثنائي الأبعاد، يمكن اعتبار المستوى من العامل الأول، المرموز له بـ  $x_{1,i}$ ، والمستوى من العامل الثاني، المرموز له بـ  $x_{2,j}$ ، بمثابة إحداثيات نقطة ضمن الفضاء التجريبي أو مجال الدراسة (انظر الشكل 6.III). فعلى سبيل المثال، إذا كان مستوى السرعة هو 90 كيلومتراً في الساعة، ومستوى الحمولة الزائدة هو 250 كيلوغراماً، فإن إحداثيات النقطة التجريبية تكون على النحو التالي:

$$x_{2,j} = 250 \text{ kg} \quad x_{1,i} = 90 \text{ km/h}$$

يُمثل كل اختبار تجريبي بنقطة داخل هذا النظام الإحداثي، ولذلك يُشار غالباً إلى التجربة بمصطلح "نقطة تجريبية" أو "نقطة اختبار" أو حتى "نقطة" فقط. ومن ثم، يُمثل مخطط التجارب بمجموعة من النقاط التجريبية، تقع جميعها ضمن الفضاء التجريبي. في المثال المذكور، تُجرى التجربة على مركبة تسير بسرعة 90 كم/س وبحمولة زائدة قدرها 250 كغ.



الشكل.III.6: في الفضاء التجريبي، تُحدّد مستويات العوامل نقاطًا تجريبية.

حتى ثلاثة عوامل، يمكن رسم مجال الدراسة. أما إذا تجاوز عدد العوامل الثلاثة، فيُستخدم تمثيل جدولي يُعرف بالتمثيل المصفوفي، وهو أكثر عمومية لأنه يتيح تصوير النقاط التجريبية ضمن حجم فائق (Hypervolume) في فضاء متعدد الأبعاد بأي عدد من الأبعاد. [4]

### 9.III المتغيرات المركزية المعيارية (المُرْمَزة)

عندما تُسند القيمة -1 للمستوى المنخفض لأحد العوامل والقيمة +1 للمستوى المرتفع، فإننا نقوم بتعديلين مهمّين:

➤ **تحويل أصل القياسات:** في المثال المختار، يمثل منتصف المجال [-1؛+1] قيمة 100 كم/سا. وبالتالي فإن القيمة العددية للأصل الجديد (الصفير) تختلف عن الأصل المعبر عنه بوحدة القياس الطبيعية.

➤ **تغيير وحدة القياس:** على سبيل المثال، إذا كان المستوى المنخفض لعامل "سرعة المركبة" هو 80 كم/سا والمستوى المرتفع 120 كم/سا، فإن الفرق بين هاتين القيمتين هو 40 كم/سا، أي مرة وحدة السرعة. بين -1 و+1 توجد وحدتان جديدتان، مما يعني أن الوحدة الجديدة تساوي 20 كم/سا، وتُعرف باسم "الخطوة" (Pas).

هاتان التعديلان يؤديان إلى إدخال متغيرات جديدة تُعرف باسم المتغيرات المركزية المعيارية (v.c.r):

مركزية للدلالة على تغيير الأصل، ومعيارية للدلالة على تغيير وحدة القياس. كما تُستخدم أيضًا تسميات مثل المتغيرات المُرْمَزة أو الوحدات المُرْمَزة. يُعطى الانتقال من المتغيرات الأصلية إلى المتغيرات المُرْمَزة، والعكس، بالصيغة التالية (حيث  $A_0$  هي القيمة المركزية بوحدات القياس الأصلية):

$$x = \frac{A - A_0}{pas} \quad (\text{Eq.III.2})$$

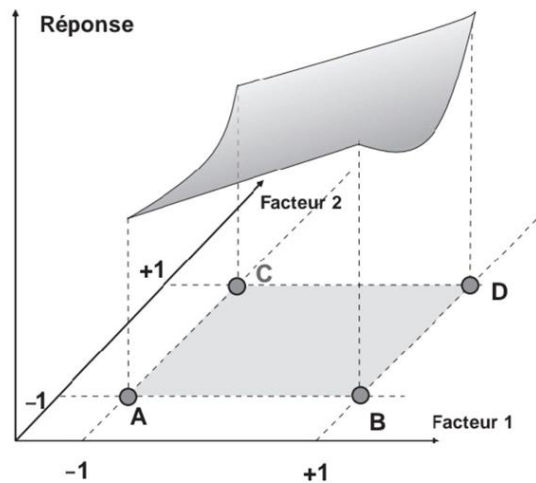
فائدة الوحدات المرّزة تكمن في القدرة على تقديم مخططات التجارب بالطريقة نفسها، مما اختلفت مجالات الدراسة أو العوامل المستخدمة. وهذا، تُظهر نظرية تصميم التجارب طابعًا عامًا وشاملاً.

ويُعدّ استخدام المتغيّرات المركزية المعيارية واسع الانتشار في برمجيات تصميم التجارب، إذ إن بعض العمليات، مثل البحث عن أفضل نقاط التجربة وفقًا لمعيار (D-optimality)، لا يمكن تنفيذها إلا باستخدام هذه المتغيّرات المرّزة من نسبة بين مقدارين لها نفس وحدة القياس الفيزيائية، وبالتالي فهي عديمة البعد.

وإنّ اختفاء الوحدات الطبيعية، إلى جانب توحيد مجال التغيّر لجميع العوامل (وهو وحدتان مُمرّتان)، يُتيح إجراء مقارنة مباشرة بين تأثيرات العوامل المختلفة. [4]

### 10.III. أسطح الاستجابة

تقابل كل نقطة ضمن مجال الدراسة استجابة معيّنة. ويقابل مجموع نقاط مجال الدراسة مجموعة من الاستجابات التي تتموضع على سطح يُطلق عليه اسم سطح الاستجابة (انظر الشكل 7.III).



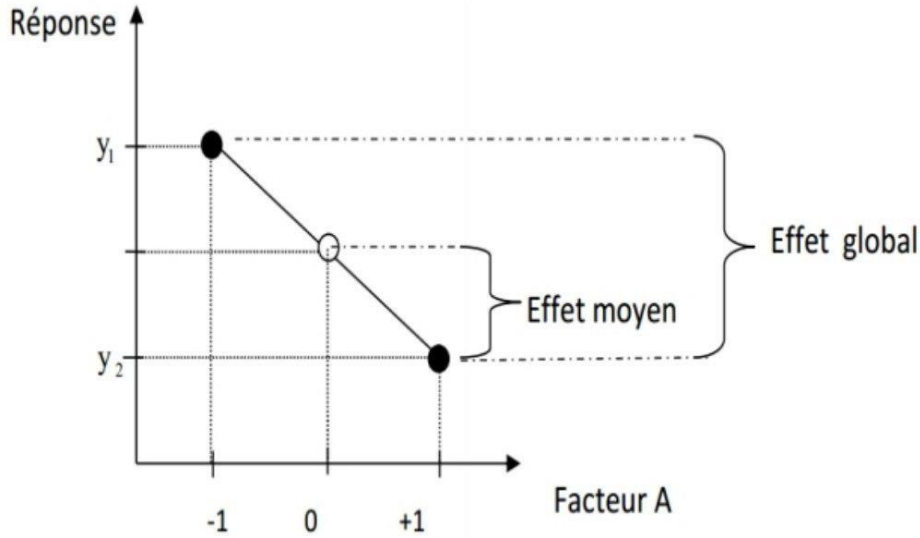
الشكل 7.III: يُشكّل مجموع الاستجابات الذي يُطابق جميع نقاط مجال الدراسة سطح الاستجابة.

بوجه عام، لا تكون لدينا إلا بعض الاستجابات المعروفة، وهي تلك التي تقابل النقاط التجريبية التي اختارها المحرّب. ولتقدير الاستجابات غير المعروفة، يتم اللجوء إلى نموذج رياضي لإجراء الاستيفاء (Interpolation)، مما يُمكن من الحصول على تمثيل تقريبي لسطح الاستجابة.

وتضمن النقاط التجريبية المختارة وفقاً لنظرية تصميم التجارب أعلى قدر ممكن من الدقة في تحديد شكل وموقع سطح الاستجابة. [4]

11.III. تأثير عامل

يُحدّد تأثير العامل «A» على الاستجابة «y» من خلال مقارنة القيم التي تأخذها «y» عندما ينتقل «A» من المستوى (-1) إلى المستوى (+1). [5] ولتكن  $y_1$  و  $y_2$  هاتين القيمتين (انظر الشكل 8.III) تُميّز بين:



الشكل 8.III. توضيح الأثر الكلي والأثر المتوسط.

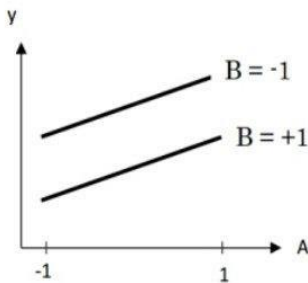
التأثير الكلي (العالم): ويُحسب بالعلاقة  $(y_2 - y_1)$

التأثير المتوسط: ويُحسب بالعلاقة  $\frac{y_2 - y_1}{2}$  [5]

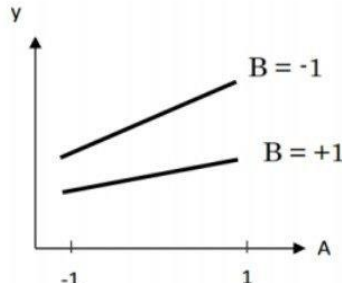
12.III. مفهوم التفاعل

في التجارب، ندرس عادة تأثير كل عامل (مثل درجة الحرارة، الزمن، التركيز...) على الاستجابة (مثل نسبة الإنتاج أو النقاوة).

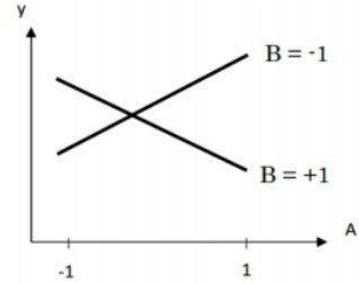
لكن أحياناً، تأثير أحد العوامل يتغيّر حسب مستوى عامل آخر. هذا ما نسميه تفاعل (Interaction). [5]



لا تفاعل بين A و B



تفاعل ضعيف بين A و B



تفاعل بين قوي بين A و B

الشكل 9.III. منحنيات التفاعلات

13.III. النمذجة الرياضية

يُختار مسبقاً تابع رياضي يربط الاستجابة بالعوامل. ويتم اعتماد تطوير محدود لسلسلة تايلور-ماك لورين. وتُفترض المشتقات ثابتة، فيأخذ هذا التطوير شكل كثير حدود من درجة معينة، قد تكون منخفضة أو مرتفعة.

$$y = \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum a_{ij} x^2 + a_{ij\dots z} x_i x_j \dots x_z \quad (\text{Eq.III.3})$$

تمثلت الاستجابة أو الكمية محل الاهتمام. يتم قياسها أثناء التجريب وتُحصل بدقة معينة.

تمثل المستوى المنسوب للعامل من قبل المحرّب لإجراء تجربة معينة. هذه القيمة معروفة بدقة تامة، ويُفترض حتى أنها محددة دون خطأ (وهي فرضية كلاسيكية في النمذجة الإحصائية).

تمثل معاملات النموذج الرياضي المفترض مسبقاً. هذه المعاملات غير معروفة ويجب حسابها انطلاقاً من نتائج التجارب. وتكمن أهمية نمذجة الاستجابة بواسطة كثير حدود في إمكانية حساب كافة الاستجابات داخل مجال الدراسة دون الحاجة إلى إجراء كل التجارب فعلياً.

يُطلق على هذا النموذج اسم "النموذج المفترض" أو "النموذج المسبق". يجب إضافة مكملين إلى النموذج المبين أعلاه، وهما: نقص المطابقة (Lack of fit) والخطأ التجريبي. وغالباً ما يُجمع هذان الانحرافان في انحراف وحيد يُرمز له بـ  $e$ . فيُكتب النموذج المُستخدم من طرف المحرّب بالشكل التالي [6]:

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum a_{ij} x^2 + a_{ij\dots z} x_i x_j \dots x_z + e \quad (\text{Eq.III.4})$$

14.III. اختيار مخطط تجريبي

يعتمد اختيار الخطة التجريبية على أهداف التجربة، وعدد العوامل المراد دراستها، وكمية الموارد المتوقّرة. يبيّن الجدول 1.III دليلاً بسيطاً كمثال لاختيار خطة تجريبية. الأنواع المختلفة لمخططات التجارب: [7]

الجدول 1.III. يمثل الأنواع المختلفة لمخططات التجارب

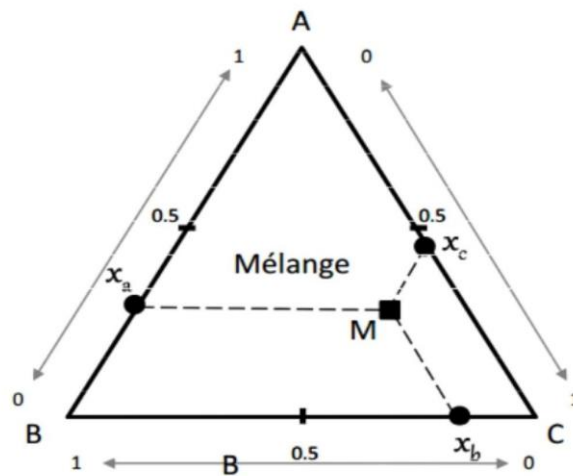
عدد العوامل	الهدف المقارن	هدف التحري	سطح الإستجابة
1	خطة عشوائية بالكامل لعامل واحد	—	—
2-4	خطة كتل عشوائية	تصميم عاملي كامل أو جزئي	مركب مركزي أو Box-behnken
5 أو أكثر	خطة كتل عشوائية	تصميم عاملي جزئي أو Plackett-Burman	تحزُّ مبدئي لتقليص عدد العوامل

15.III. الأنواع المختلفة لمخططات التجارب

توجد ثلاث عائلات رئيسية من مخططات التصميم التجريبي، وهي: مخططات الخلطات، ومخططات التنخيل، ومخططات النمذجة (سطوح الاستجابة).

1.15.III. مخططات الخلطات (Plans De Mélanges)

تُعدّ مخططات الخلطات نوعًا خاصًا من مخططات التصميم التجريبي، وهي ملائمة لدراسة العوامل التابعة. تُستخدم أساسًا لتحليل تأثير نسب مكونات منتج معين على استجابة محددة. [8] العوامل فيها ليست مستقلة، بل تخضع لقيود (انظر الشكل 10.III). ومن أمثلة هذه القيود: يجب أن يكون مجموع الكسور المولية لمكونات خليط ما مساويًا لـ 1. [7]



الشكل 10.III. قيم المكونات في مخطط مزيج بثلاثة مكونات. [7]

2.15.III. مخططات الفرز (Plans de criblage):

يهدف هذا النوع من المخططات إلى الكشف عن العوامل الأكثر تأثيرًا في استجابة معينة. ولا يتم في هذا السياق تحديد علاقة دقيقة بين تغيّرات العوامل وتغيّر الاستجابة.

من بين المخططات المقترحة: المخططات العاملية الكاملة ذات مستويين، المخططات العاملية الكسرية، ومخططات Plackett-Burman. [8]

1.2.15.III. المخططات العاملية الكاملة

تُعدّ المخططات العاملية الكاملة أحد أنواع مخططات التصميم التجريبي، وقد نشأت عن أعمال R.A. Fisher. تتميز هذه المخططات بعدة مزايا، منها:

لا يأخذ كل عامل سوى مستويين، مما يجعل التجارب سهلة التحكم ويقلل من احتمالية وقوع الأخطاء.

تُعتبر المخططات العاملية الكاملة من بين أفضل المخططات التجريبية، إذ تدرس جميع التركيبات الممكنة لمستويات العوامل المدروسة، وتضمن بذلك الحصول على أفضل النتائج.

التمذجة الرياضية تكون فورية ومباشرة.

### III.2.15.2. المخططات الكسرية

يعتمد هذا النوع من المخططات على استخدام مصفوفة التأثير الخاصة بمخطط عاملي كامل من النوع لدراسة "k" من العوامل، مما يسمح بتقليص عدد التجارب بمقدار. وفي المخطط العاملي الكسري، تكون التأثيرات الرئيسية دائماً متداخلة مع التفاعلات.

### III.2.15.3. مخططات Plackett-Burman

قام كل من R.L. Plackett و J.P. Burman بنشر دراستها سنة 1946 في مجلة Biometrika، حيث عرضا طريقة بناء مخططات تتيح دراسة عدد كبير من العوامل باستخدام عدد محدود من التجارب. وقد خصصا مستويين لكل عامل، وافترضوا أن جميع التفاعلات بين العوامل محتملة مقارنة بالتأثيرات الرئيسية [8].

يعتمد مخطط Plackett-Burman على مصفوفة Hadamard، والتي تتميز بالخصائص التالية:

عناصرها هي (1+) و(1-) فقط؛

المصفوفات تكون مربعة الشكل ومتعامدة (Orthogonales).

### III.3.15.3. طريقة سطح الاستجابة

المخططات التي تم تناولها سابقاً لا تعتمد سوى على مستويين للدراسة لكل عامل، وكانت النماذج الرياضية المستخدمة من الدرجة الأولى (مع أو بدون تفاعلات) بالنسبة لكل عامل. تُعد هذه المخططات الأكثر استخداماً، نظراً لقدرتها على تنخيل العوامل، كما أنها تؤدي في بعض الأحيان إلى نماذج رياضية بسيطة لكنها كافية. ومع ذلك، توجد العديد من الحالات التي يكون فيها من الضروري الحصول على نمذجة دقيقة للظواهر المدروسة، وهو ما يستدعي الانتقال إلى نماذج رياضية من الدرجة الثانية. في هذه الحالة، يتم اللجوء إلى مخططات سطح الاستجابة، والتي تعتمد على نماذج متعددة الحدود (polynomiales) من الدرجة الثانية.

سندرس في هذا السياق ثلاثة من أهم المخططات من هذا النوع: المخططات المركبة (composites)، مخططات Box-Behnken، ومخططات Doehlert [9].

النموذج الرياضي المفترض استخدامه مع مخططات سطح الاستجابة هو نموذج من الدرجة الثانية مع تفاعلات من المرتبة الثانية:

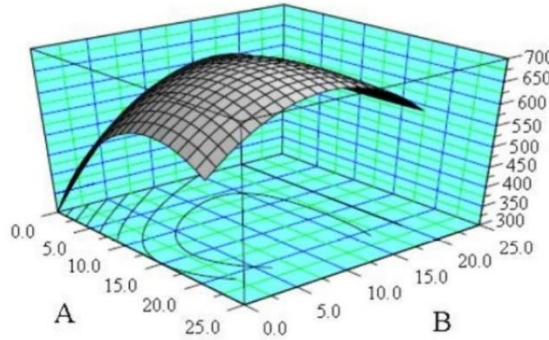
من أجل عاملين:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + e \quad (\text{Eq.III.5})$$

من أجل ثلاث عوامل:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + e \quad (\text{Eq.III.6})$$

يسمح هذا النوع من النماذج بتقدير سطح الاستجابة بهدف دراسة التأثيرات الخطية، التأثيرات التربيعية، والتأثيرات الناتجة عن التفاعلات.



الشكل.III.11: سطح الإستجابة

توجد عدة أنواع من المخططات من الدرجة الثانية، وأكثرها استخدامًا هي:

المخططات المركبة المركزية (Les plans composites centrés)

مخططات Box-Behnken

### III.15.3.1 المخططات المركبة المركزية (Les Plans Composites Centrés)

تُعد المخططات المركبة ملائمة تمامًا لإجراء الدراسات بشكل تسلسلي. تتكون المرحلة الأولى من الدراسة من مخطط عاملي كامل أو جزئي، يُستكمل بنقاط مركزية تهدف إلى التحقق من صحة نموذج الاستجابة الخطي (أي المصطلحات من الدرجة الأولى ومصطلحات التفاعل). إذا كانت اختبارات التحقق إيجابية (أي أن الاستجابة المقاسة في مركز المجال تكون مساوية إحصائيًا للاستجابة المحسوبة في نفس النقطة)، فإن الدراسة تُختتم غالبًا عند هذا الحد. أما إذا كانت النتائج سلبية، فيُشرع في تجارب إضافية من أجل بناء نموذج من الدرجة الثانية.

[10]

تتمثل هذه التجارب الإضافية في نقاط تجريبية تقع على محاور الإحداثيات، إضافة إلى نقاط مركزية جديدة. وتُسمى النقاط الواقعة على المحاور بنقاط النجم أو النقاط النجمية. وعليه، فإن المخططات المركبة تتكون من ثلاث أجزاء (انظر الشكل.III.12):

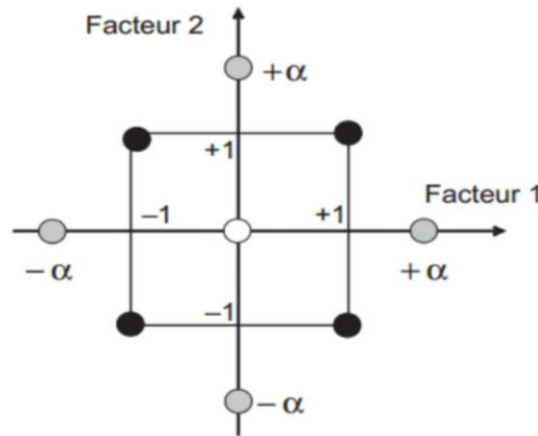
**المخطط العاملي:** هو مخطط عاملي كامل أو جزئي بمستويين لكل عامل. تكون النقاط التجريبية في هذا النوع من المخططات ممتوزعة عند رؤوس مجال الدراسة.

**المخطط النجمي:** تقع نقاط هذا المخطط على المحاور، وتكون عادة كلها على مسافة متساوية من مركز مجال الدراسة.

النقاط في مركز مجال الدراسة: يتم دائماً تضمين نقاط تجريبية تقع في مركز مجال الدراسة، وذلك سواء في المخططات العاملية أو في المخططات النجمية. يُمثل العدد الإجمالي للتجارب الواجب إنجازها بمجموع التجارب المتعلقة بالمخطط العاملية ( $n_f$ )، وتلك الخاصة بالمخطط النجمي ( $n_\alpha$ )، بالإضافة إلى التجارب في المركز ( $n_0$ ).

ويُعطى عدد التجارب في المخطط المركب بالعلاقة التالية:

$$n = n_f + n_\alpha + n \quad (\text{Eq.III.7})$$

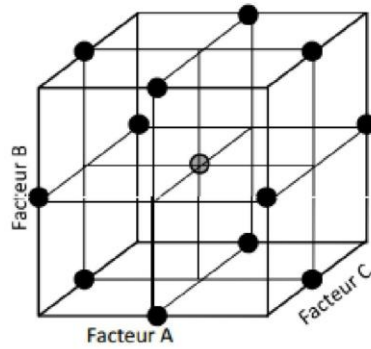


الشكل.III.12: مخطط مركب مركزي

### III.2.3.15. مخططات Box-Behnken :

يُعد مخطط Box-Behnken منهجية ضمن مخططات سطح الاستجابة (RSM)، ولا يتطلب سوى ثلاثة مستويات لتنفيذ التجربة (انظر الشكل.III.13). وهو مخطط خاص من المستوى الثالث، إذ لا يحتوي على أي نقطة عند رؤوس المجال التجريبي. وقد يكون ذلك مفيداً عندما تمثل النقاط الواقعة عند زوايا المكعب توليفات من المستويات تكون مكلفة جداً أو مستحيلة التنفيذ بسبب قيود مرتبطة بالعملية. [7]

يمثل الشكل III.13 مخططاً مركباً مركزياً (Central Composite Design) لثلاثة عوامل. ويتضمن اثنتي عشرة نقطة تجريبية تقع عند منتصف حواف المكعب، بالإضافة إلى ثلاث نقاط عند المركز. [11]



الشكل.III.13: تمثيل تخطيطي لخطة Box-Behnken لثلاثة عوامل. [7]

### 16.III. تقييم النموذج

قد لا يصف النموذج الرياضي المتوصل إليه بعد ملاءمة الاستجابة مع البيانات بشكل مرضٍ المجال التجريبي المدروس. ومع ذلك نستخدم الطرق التالية لتقييم جودة النموذج المعدل.

### 1.16.III. تحليل التباين (ANOVA)

يُعدّ تحليل التباين طريقة تهدف إلى دراسة تأثير عامل أو عدة عوامل ضمن عملية معينة؛ ويمكن استخدامه لتحليل البيانات التجريبية التي تتضمن عوامل كمية ونوعية في آن واحد. [12]

### 2.16.III. مجموع المربعات

يُشتق تحليل التباين من تقسيم التغير الكلي إلى مكوناته:

$SS_{tot}$ : مجموع المربعات الكلي، وهو يُقدّر مقدار التغير الكلي في البيانات (أي يقيس تشتت البيانات حول المتوسط العام):

$$SS_{tot} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x})^2 \quad (\text{Eq.III.8})$$

$$SS_{tot} = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \quad (\text{Eq.III.9})$$

تشير هذه المعادلة إلى أن التغير الكلي في البيانات، كما يُقاس بمجموع المربعات المصحح الكلي، يمكن تقسيمه إلى [13]:

$SS_{reg}$ : مجموع المربعات العائد إلى الانحدار، والذي يُقدّر الفروقات بين متوسطات المعالجات والمتوسط العام:

$$SS_{reg} = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2 \quad (\text{Eq.III.10})$$

$SS_{res}$ : مجموع المربعات العائد إلى البواقي (الخطأ)، والذي يُقدّر الفروقات بين الملاحظات داخل كل معالجة مقارنة بمتوسط المعالجة:

$$SS_{res} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 = \sum_{i=1}^k (n_i - 1) s_i^2 \quad (\text{Eq.III.11})$$

وبالتالي، نستنتج أن:

$$SS_{res} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 = \sum_{i=1}^k (n_i - 1) s_i^2 \quad (\text{Eq.III.12})$$

### 3.16.III. التباين

نظرًا لأن مجموعات المربعات الثلاث:  $SS_{res}$  و  $SS_{reg}$  و  $SS_{tot}$ ، لا تستند إلى نفس عدد القيم المربعة المُجمّعة، فلا يمكن مقارنتها بشكل مباشر. وقبل إجراء أي مقارنة بينها، يجب أخذ درجات الحرية الخاصة بكل مجموعة مربعات بعين الاعتبار. [13]

### 4.16.III. الإختبار الإحصائي

من أجل اتخاذ قرار بشأن رفض الفرضية العدمية في تحليل التباين، نقوم بمقارنة القيم المحسوبة لكل من التباين داخل المجموعات والتباين بين المجموعات.

✚ إذا كانت القيمتان متقاربتين جدًا، فإن ذلك يُشير إلى أن الفرضية العدمية قد تكون صحيحة.

✚ أما إذا كان التباين بين المجموعات أكبر بشكل ملحوظ من التباين داخل المجموعات، فإن ذلك يُشير إلى أن الفرضية البديلة هي

الأرجح. ولتحويل هذه الإجراءات إلى إطار اختباري رسمي، يجب علينا تحديد إحصائية اختبار. [12]

وتمثل هذه الإحصائية في النسبة التالية:

$$F = \frac{MS_{reg}}{MS_{res}} \quad (\text{Eq.III.13})$$

حيث:

$MS_{reg}$ : متوسط مربعات الانحدار (أي: مجموع مربعات الانحدار مقسومًا على درجات الحرية المناسبة).

$MS_{res}$ : متوسط مربعات البواقي (الخطأ).

### ✚ الاحتمالية p

تُعد القيمة الإحصائية الأهم في جدول تحليل التباين هي قيمة الاحتمالية p. وتُستخدم هذه القيمة لتحديد مدى تأثير المتغيرات ضمن النموذج، كما

تُستخدم للحكم على مدى دلالة التأثيرات إحصائيًا في النموذج. يمكن تقييم أهمية البيانات من خلال قيمة p، حيث تشير القيم القريبة من الصفر

إلى أهمية أكبر للنتائج. [12]

### ✚ معاملات التحديد

يُعرّف معامل التحديد على أنه النسبة الجزئية من تغيرات الاستجابة التي يُفسرها النموذج فقط. ويُعطى هذا المعامل بالعلاقة التالية:

$$R^2 = \frac{SS_{reg}}{SS_{tot}} = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (\text{Eq.III.14})$$

يُعد معامل بذلك مقياسًا لجودة النموذج، وتتراوح قيمته بين 0 و 1. فإذا كان قريبًا من 1، فإن النموذج يُمكنه استرجاع القيم المقيسة للاستجابات بدقة. أما إذا كان مساويًا لـ 0، فهذا يعني أن النموذج لا يفسر شيئًا. [13]

### معامل التحديد المعدل

يُعرف معامل التحديد المعدل بنفس الطريقة، على أنه النسبة الجزئية من تغيرات الاستجابة التي يُفسرها النموذج فقط، مع الأخذ بعين الاعتبار درجات الحرية المقابلة. ويُعطى هذا المعامل بالتعبير التالي:

$$R_{adj}^2 = \frac{\frac{SS_R}{k-1}}{\frac{SS_E}{n-1}} \quad (\text{Eq.III.15})$$

ونظرًا لأخذ درجات الحرية بعين الاعتبار، فإننا نجد دائمًا أن:  $R_{adj}^2 \leq R^2$  [6,14]

### 5.16.III. دالة الرغبة (Desirability Function)

تُعد دالة الرغبة (DF) تقنية شائعة تُستخدم لاكتشاف الشروط المثلى العامة اعتمادًا على دالة الرغبة. إذ تقوم هذه الأخيرة بتمييز كل استجابة فردية (di) وإنشاء دالة خاصة بها. وفي النهاية، تقوم DF بتحديد دالة رغبة شاملة (D) يُفترض تعظيمها بعد اختيار القيم المثلى للعوامل المؤثرة، مع مراعاة التفاعلات بينها. [15]

تُكمن الميزة الأساسية لدالة الرغبة في قدرتها على توفير استجابات نوعية وكمية من خلال تحويل سريع وبسيط لمختلف الاستجابات إلى مقياس موحد. حيث يجب أولاً تحويل الاستجابة (U) إلى دالة رغبة خاصة تقع ضمن المجال [0-1]، بحيث تمثل القيمة الحدية 1 أعلى درجة من الرغبة. أما إذا كانت قيمة الرغبة تساوي صفرًا (0)، فهذا يعني انعدام الرغبة تمامًا، أو أن الحالة الممثّلة تعبر عن الحد الأدنى لقابلية تطبيق هذه الدالة. [15]

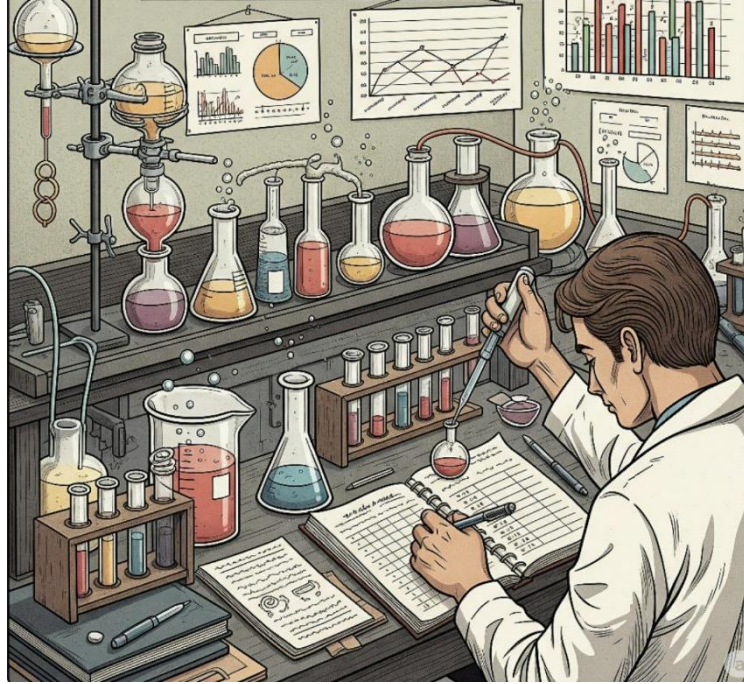
- [1] American Society for Quality (ASQ). (n.d.). Design of Experiments (DoE). Retrieved May 14, 2025, from <https://asq.org/quality-resources/design-of-experiments>
- [2] Montgomery, D. C. (2017). Design and Analysis of Experiments (9th ed.). Wiley
- [3] Durakovic, B. (2017). Design of experiments application, concepts, examples: State of the art. Periodicals of Engineering and Natural Sciences, 5(3), 421–439.
- [4] Jacques Goupy, Lee Creighton, DUNOD, Paris, 2001.
- [5] [YAHIAOUI I ; 2015] : YAHIAOUI Idris, « Les plans d'expériences Initiation à la construction et l'analyse des plans factoriels complets à deux niveaux et du plan composite centré ». Université A. MIRA – Bejaia, Faculté de Technologie, Département de Génie des Procédés
- [6] G. E. P. Box, J. S. Hunter, W. G. Hunter. Statistics for Experimenters. John Wiley & Sons, 2nd edition, New Jersey (2005).
- [7] DAAS M S ; 2020] : DAAS Mohamed Skander « Plans d'expériences » <http://Fac.umc.edu.dz>, 79p, 2020,
- [8] BOUDJENIBA-BOUZAOUIT Nadia. « Etude par simulations numériques de la réactivité dans la réaction d'acylation enzymatique de substrats osidiques ». 2012
- [9] Bouchra WAHADAME. « Analyse et optimisation du fonctionnement de plies à combustible par la méthode des plans d'expériences ». 21 novembre 2006
- [10] Redhouane LOMBARKIA. ETUDE, « SIMULATION ET EXPERIMENTATION DU COMPORTEMENT MECHANIQUE DES COUVERCLES DES BOITES D'EMBALAGE METALLIQUES POUR PRODUITS CHIMIQUES ». 07/06/2012
- [11] [DALI A et ALLOUT A ; 2022] : DALI Ahlam, ALLOUT Amal « Modélisation numérique Et optimisation par la méthode des surfaces de réponses des murs en terre armée » Mémoire De Master, Université 8 Mai 1945 de Guelma
- [12] R. L. Mason, R. F. Gunst, J. L. Hess. Statistical design and analysis of experiments, with applications to engineering and science. John Wiley & Sons, New Jersey (2003).
- [13] C. M. Judd, G. H. McClelland, C. S. Ryan. Data Analysis: A Model Comparison Approach to Regression, ANOVA, and Beyond. Taylor and Francis group, 3rd edition, New York, (2017).

- [14] P. Goose, D. Meintrup. *Statistics with JMP: Hypothesis test, ANOVA and regression*. John Wiley & Sons, 1st edition (2016).
- [15] M Roosta, M Ghaedi, A Daneshfar, R Sahraei, AAsghari: Optimization of the ultrasonic assisted removal of methylene blue by gold nanoparticles loaded on activated carbon using experimental design methodology. *UltrasonicsSonochemistry* 21 (2014) 242–252. Yuh-Shan. H et al (2005).

---

# الفصل الرابع:

## المواد والطرق



1.IV. المقدمة

يُعدّ الإيثانول من المركّبات الحيوية واسعة الاستخدام، سواء في الصناعات الصيدلانية، أو في تحضير مستحضرات التجميل، أو حتى كوقود حيوي بديل. وقد شهدت السنوات الأخيرة اهتمامًا متزايدًا بإنتاجه من مصادر طبيعية متجددة، وذلك بالاعتماد على عملية التخمير الحيوي، مع محاولة ضبط الشروط والعوامل المؤثرة على مردود هذه العملية ونجاعتها.

وفي هذا الإطار، حُصّص هذا الفصل لعرض مختلف المراحل والتقنيات المخبرية المعتمدة في إنتاج الإيثانول انطلاقًا من التمر كمادة أولية.

2.IV. تحضير المادة الأولية

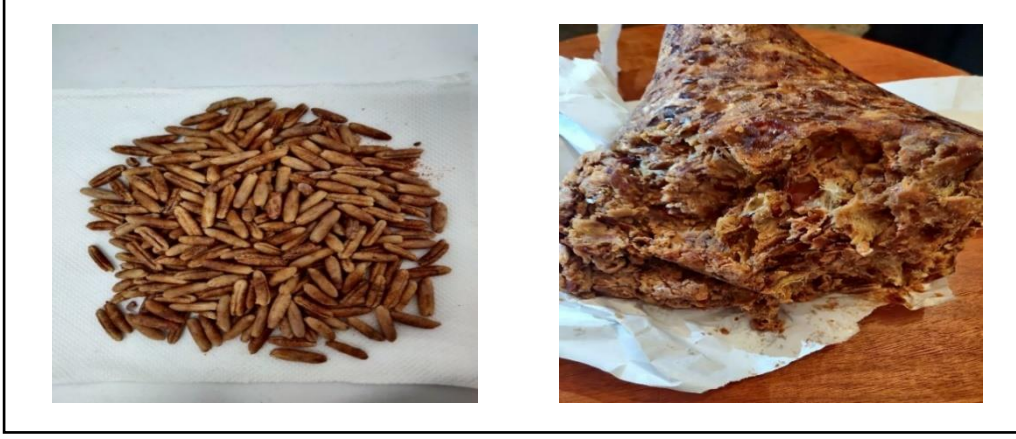
تم إنجاز هذا العمل على مستوى مخبر البحث التابع للمدرسة العليا للأساتذة بسكيكدة، حيث تم اختيار تمر الغرس كمادة أولية لاستخلاص الإيثانول نظرًا لغناه بالسكريات القابلة للتخمير وتوفره الواسع، الاسم العلمي لهذا الصنف هو *Phoenix dactylifera L*، ويعد من أكثر الأصناف إنتاجًا في الجزائر لاسيما في ولايات الجنوب الشرقي. تم إقتناء الكمية اللازمة من محلات بيع التمور بمدينة عزابة، ولكن مصدرها الأصلي لم يحدد بدقة.

المكونات الأساسية لتمر الغرس

الجدول.1.IV: المكونات الأساسية لتمر الغرس

المكونات	النسبة المئوية
السكريات الكلية	(70-80)% غالبيتها غلوكوز وفراكتوز
الماء	(15_30)% تكون أقل في التمر الجاف
البروتينات	1.5-2.5%
الدهون	0.2-0.5%
الألياف الغذائية	6-8%
المعادن	1.5-2.5%
الفيتامينات	كميات ضئيلة جدا

شملت عملية التحضير إزالة النوى من التمر، حيث تم نزعها وغسلها جيدًا بالماء المقطر لإزالة الشوائب، ثم تُركت لتجف، وبعد ذلك طُحنت للحصول على مسحوق ناعم، وقد استُخدم هذا المسحوق ضمن خطوات العمل لاختبار مساهمته في تحسين إنتاج الإيثانول.



الشكل. IV. 1: المادة الأولية المستخدمة في عملية انتاج الايثانول (تمر الغرس وأنويته).



الشكل. IV. 2: عجينة التمر منزوع النوى ومسحوق الأنوية

### 3.IV. تجارب إستخلاص السكر

لإستخلاص أكبر كمية ممكنة من السكر، يتم خلط كمية محددة من تمر الغرس منزوع النوى مع حجم معين من الماء المقطر. يتم تعريض المزيج للأمواج فوق صوتية عند درجة حرارة محددة ولمدة زمنية معينة. وللحصول على عملية استخلاص مثالية، تم دراسة تأثير عوامل أساسية على هذه العملية والمتمثلة في: كتلة التمر / حجم الماء ( $\frac{m}{v}$ ) من 0.1 إلى 0.55، درجة حرارة الاستخلاص ( $T_{ex}$ ) من 60 إلى 80 درجة مئوية وزمن الاستخلاص ( $t_{ex}$ ) من 30 إلى 120 دقيقة.

الجدول.IV.2: العوامل المؤثرة في عملية الإستخلاص

المستوى الأعلى	النقطة المركزية	المستوى الأدنى	الرمز	الوحدة	العوامل
0,55	0,325	0,1	$\frac{m}{V}$	$\frac{g}{l}$	النسبة بين كمية التمر والماء المقطر
80	50	20	$T_{ex}$	$^{\circ}C$	درجة الحرارة
60	35	10	$t_{ex}$	min	زمن الاستخلاص

تم نمذجة هذه العملية بالاعتماد على طريقة تصميم التجارب (DoE) باستخدام نموذج Box-Behnken الذي سمح لنا بإنجاز 15 تجربة، كما هو موضح في الجدول أدناه. مع العلم أننا قمنا باستعمال مجالات أولية معينة للعوامل السابق ذكرها كما هو موضح في الجدول 1 في الملحقات.

الجدول.IV.3: تجارب الإستخلاص

التجارب	$\frac{m}{v}$	$T_{ex}^{\circ}$	$t_{ex}$	المردود %R	$m_{sucre}$	$\frac{m_{sucre}}{m_{datte}}$
1	0,100	20	35	%8,5	4,25	0,85
2	0,550	20	35	%28,25	14,125	0,513
3	0,100	80	35	%7,75	3,875	0,775
4	0,550	80	35	%27,25	13,625	0,495
5	0,100	50	10	%7,5	3,75	0,75
6	0,550	50	10	%28,25	14,125	0,513
7	0,100	50	60	%8,25	4,125	0,825
8	0,550	50	60	%30	15	0,54
9	0,325	20	10	%20,25	10,125	0,61
10	0,325	80	10	%20	10	0,6
11	0,325	20	60	%18,5	9,25	0,56
12	0,325	80	60	%19,75	9,875	0,598
13	0,325	50	35	%19,75	9,875	0,598
14	0,325	50	35	%20,25	10,125	0,613
15	0,325	50	35	%20,25	10,125	0,613



الشكل. IV. 3: مراحل عملية إستخلاص السكر من التمر منزوع النوى.

تم تحديد كمية السكر المستخلصة في جميع العينات المدروسة باستخدام جهاز قياس قرينة الإنكسار، وذلك بالاعتماد على سلم Brix.



الشكل. IV. 4: جهاز قياس قرينة الإنكسار.

#### 4.IV. مرحلة التخمر

بعد تحديد الشروط المثلى لعملية الاستخلاص باستخدام برنامج Box-Behnken، والتي تمثلت في:

$$m/v=0.1955 \frac{\text{كغلة التمر}}{\text{حجم الماء}}, \text{ درجة حرارة الإستخلاص } T_{\text{ex}}=43.04 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ و مدة الاستخلاص } t_{\text{ex}} = 35 \text{ min.}$$

تم تحضير عينات عصير التمر وفق هذه الشروط، حيث احتوت كل عينة على 200 مل من الماء المقطر و39 غرامًا من التمر منزوع النوى. بعد خلط المكونات بواسطة خلاط كهربائي للحصول على مزيج متجانس، أُضيفت إلى كل عينة كمية محددة من خميرة الخبز (*Saccharomyces cerevisiae*)، ومسحوق نوى التمر، بالإضافة إلى بضع قطرات من محلول منظم (Tampon) لضبط درجة الحموضة. وُضعت العينات بعد ذلك في فرن على درجة حرارة 32°C وذلك نظرًا لكونها درجة الحرارة المثلى لنمو الخميرة. وقد تم تغيير العوامل المذكورة السابقة في كل تجربة لمعرفة مدى تأثيرها على عملية التخمر:

درجة الحموضة (pH) من 4.5 إلى 6، كمية أنوية التمر المضافة ( $m_{nd}$ ) من 0 إلى 3 غرام / لتر، كمية الخميرة ( $m_l$ ) من 0.25 إلى 3 غرام / لتر و مدة التخمر ( $t_f$ ) من 20 إلى 72 ساعة .

#### الجدول. IV. 4: العوامل المؤثرة في عملية التخمر.

العوامل	الوحدة	الرمز	المستوى الأدنى	النقطة المركزية	المستوى الأعلى
كمية الخميرة	$\frac{g}{l}$	$m_l$	0,25	1,625	3
كمية أنوية التمر	$\frac{g}{l}$	$m_{nd}$	0	1,5	3
درجة الحموضة	/	pH	3	4,5	6
زمن التخمر	h	$t_f$	20	46	72

تم نمذجة هذه العملية بالاعتماد على طريقة تصميم التجارب (DoE) باستخدام نموذج Box-Behnken الذي سمح لنا بإنجاز 27 تجربة كما هو موضح في الجدول أدناه.

الجدول IV.5: مصفوفة تجارب التخمر المنجزة باستخدام نموذج Box-Behnken.

التجارب	pH	m <sub>l</sub>	t <sub>f</sub>	m <sub>nd</sub>
1	3,0	0,250	46	1,5
2	6,0	0,250	46	1,5
3	3,0	3,000	46	1,5
4	6,0	3,000	46	1,5
5	4,5	1,625	20	0,0
6	4,5	1,625	72	0,0
7	4,5	1,625	20	3,0
8	4,5	1,625	72	3,0
9	3,0	1,625	46	0,0
10	6,0	1,625	46	0,0
11	3,0	1,625	46	3,0
12	6,0	1,625	46	3,0
13	4,5	0,250	20	1,5
14	4,5	3,000	20	1,5
15	4,5	0,250	72	1,5
16	4,5	3,000	72	1,5
17	3,0	1,625	20	1,5
18	6,0	1,625	20	1,5
19	3,0	1,625	72	1,5
20	6,0	1,625	72	1,5
21	4,5	0,250	46	0,0
22	4,5	3,000	46	0,0
23	4,5	0,250	46	3,0
24	4,5	3,000	46	3,0
25	4,5	1,625	46	1,5
26	4,5	1,625	46	1,5
27	4,5	1,625	46	1,5



الشكل IV.5: مراحل عملية التخمير

#### 5.IV. مرحلة التقطير

تمت عملية التقطير بهدف استخلاص الإيثانول الناتج عن عملية التخمير وفصله عن باقي مكونات الوسط. استُخدم جهاز تقطير بسيط، كما هو موضح في الصورة، ويتكوّن من العناصر التالية:

• دورق كروي (Ballon à fond rond) تحتوي على الوسط المخمّر.

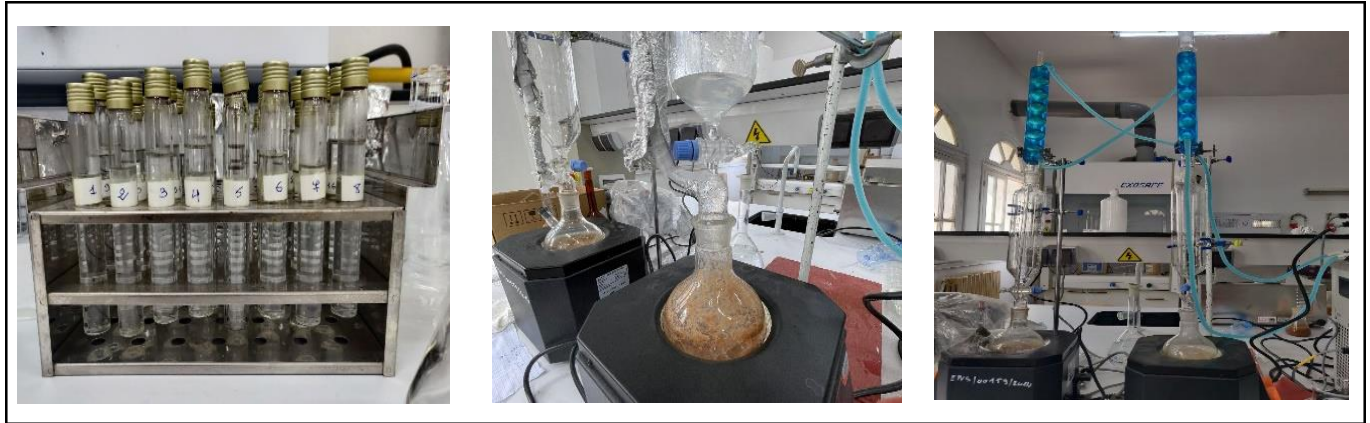
• مكثف عمودي (réfrigérant à eau) يعمل على تبريد الأبخرة وتحويلها إلى سائل.

• أنبوب استقبال (récepteur) لتجميع السائل المقطّر.

• مصدر حراري يُستخدم لتسخين الخليط تدريجيًا.

تم تسخين المزيج داخل الدورق عند درجة حرارة تقارب  $78.5^{\circ}\text{C}$ ، وهي درجة غليان الإيثانول، مما أدى إلى تبخّره. مرّ البخار الناتج عبر المبرّد الذي يُمرّر فيه ماء بارد لتسهيل عملية التكثيف، ثمّ جُمع السائل المتكثف في أنبوب الاستقبال.

كانت النتيجة سائلًا شفافًا يُفترض أن يكون غنيًا بالإيثانول. وقد مكّنت هذه المرحلة من عزل الإيثانول وفصله جزئيًا عن باقي المواد العضوية، مثل الخلايا الميتة وبقايا التمر. يتم تحديد تركيز الإيثانول في العينات باستخدام الكروماتوغرافيا في الطور الغازي.



الشكل IV.6: عملية التقطير.

#### 6.IV. الخاتمة

سمح لنا استخدام البروتوكولات التجريبية المعتمدة أثناء عملية الإستخلاص، التخمر والتقطير بالحصول على عينات متفاوتة التركيز من الكحول الناتج.

---

# الفصل الخامس:

## تحليل النتائج

RESULTS ANALYSIS



1.V. نمذجة عملية إستخلاص السكر من التمر

اخترنا في هذه الدراسة، العمل مع لتصاميم (Box-Behnken BBD)، والتي يتم من خلالها تغيير جميع العوامل من تجربة إلى أخرى من أجل تقدير تأثيراتها المختلفة، بعبارة أخرى ندرس تأثير أحد العوامل بتغيير العوامل الأخرى في الاستجابة، تكمن مزايا التصاميم المعمول بها بشكل أساسي في انخفاض تكلفتها، انخفاض عدد التجارب، ودراسة التداخلات المحتملة بين العوامل. يتألف تصميم بوكس-بهنكن (BBD) من  $2^k$  تجربة (k: تمثل العوامل الثلاثة في التجربة، 2: عدد مستويات كل تجربة)، وهو مفيد جدًا للدراسات الأولية أو لمرحلة التحسين. في دراستنا هذه، تم استخدام تصميم تجريبي كامل مكون من 15 تجربة لدراسة أهمية العوامل الفيزيوكيميائية (النسبة بين كتلة التمر وحجم الماء  $\frac{m}{V}$ )، درجة حرارة الاستخلاص ( $T_{ex}$ )، زمن الاستخلاص ( $t_{ex}$ )، في تحسين نسبة السكر في عصير التمر ومردود استخلاصه. يوضح الجدول (1.V) عوامل الإدخال ومستوياتها في التجربة. ولدراسة التداخلات المختلفة بين العوامل الفيزيوكيميائية التي تؤثر على التفاعل، استخدمنا طريقة التصميم التجريبي بثلاثة عوامل مستقلة بمستويات مختلفة، بما في ذلك النسبة بين كتلة التمر وحجم الماء  $\frac{m}{V}$ )، درجة الحرارة  $T_{ex}$ ، زمن الاستخلاص  $t_{ex}$  مع التكرارات الثلاثة في النقطة المركزية.

الجدول 1.V: المستويات المختلفة للعوامل التي تم العمل بها في دراسة نسبة السكر في عصير التمر ومردود استخلاصه.

العوامل	الوحدة	الرمز	المستوى الأدنى	النقطة المركزية	المستوى الأعلى
النسبة بين كمية التمر وحجم الماء	$\frac{g}{l}$	$\frac{m}{V}$	0,1	0,325	0,55
درجة الحرارة	$^{\circ}C$	$T_{ex}$	20	50	80
زمن الاستخلاص	min	$t_{ex}$	10	35	60

في هذه الدراسة، تم اختيار نسبة السكر في عصير التمر ومردود استخلاصه كاستجابتين ( $Y_1, Y_2$ ) للحصول على الشروط المثلى للعوامل، تم تحليل البيانات باستخدام البرنامج الإحصائي Minitab 22، والذي استعمل لإنتاج التغييرات الأساسية الفردية والتغييرات الأساسية المتداخلة بين مختلف العوامل المدروسة [34]. في هذه الدراسة، تم إعطاء العدد الإجمالي للتجارب التي أجريت من خلال هذه المعادلة:

$$N_{exp}^{br} = 2^E + P \quad (\text{Eq.V.1})$$

حيث:

E : عدد العوامل المدروسة.

P : عدد نقاط المركز المطبقة لاختبار الحدود التريعية بين المستويات المنخفضة والعالية.

وتستخدم النقاط المركزية لتقدير وضوح وانحناء النموذج المطبق وهكذا، تم إجراء 15 تجربة في هذه الدراسة، بما في ذلك مجموعة من مستويات العوامل المدروسة كما هو موضح في الجدول (2.V). يمكن تطبيق نتائج التصميم المشار إليه من حيث نموذج الانحدار والاستجابة النظرية الجدول (2.V)، من خلال المعادلة التالية:

$$(y) = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k a_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (\text{Eq.V.2})$$

حيث:

ε: هو الحد المتبقي.

a<sub>0</sub>: هو متوسط قيمة النتيجة.

a<sub>i</sub>: هو المعاملات الخطية.

a<sub>ijk</sub> و a<sub>ij</sub>: يرمز إلى معاملات التفاعل بين العوامل المدروسة.

x<sub>i</sub>, x<sub>j</sub>, x<sub>k</sub>: العوامل المستقلة.

تم استخدام برنامج Minitab 22 الإحصائي لنظام ويندوز لإنشاء تصميم التجارب (DoE) وتحليل البيانات المتحصل عليها، باعتماد اختبار F-Value و P-Value لتحليل المعاملات واستخدام معادلة رياضية من الدرجة الثانية لحساب معاملات الانحدار، استخدم اختبار عدم التطابق لتقييم مدى التوافق مع النماذج الرياضية، تم التحقق من الدلالة الإحصائية للنموذج باستخدام اختبار F-test. تم تطبيق التمثيل البياني لسطح الاستجابة لتوضيح تأثيرات العوامل المستقلة على الإستجابات المختارة واختيار أفضل نموذج على أساس أعلى قيم R<sup>2</sup>، ويجب أن تكون قيم P أقل من 0.05.

### 1.1.V. تصميم نموذج بوكس-بهنكن الكامل 3<sup>2</sup>


تم إجراء تحسين التصميم التجريبي لنموذج بوكس-بهنكن الكامل في شكل مصفوفة من 15 تجربة لمستويات مختلفة من العوامل المدروسة و نسبة السكر في عصير التمر ومردود استخلاصه التي تم الحصول عليها والتنبؤ بها، كما هو موضح في الجدول (2.V) وتظهر النتائج التي تم الحصول عليها بوضوح أن نسبة السكر في عصير التمر (%R) تراوحت بين 7,25% إلى 28,75% ومردود استخلاص التمر ( $m^{sucre}/m^{datte}$ ) يتراوح بين 0,85 و 0,481 ويمكن اعتبار هذه المساحة التجريبية الكبيرة ميزة لدراستنا حيث يمكن أن تحتوي على الشروط المثلى المطلوبة، وباستخدام هذه النتائج يمكننا تقدير التغييرات الأساسية الفردية والتغييرات الأساسية المتداخلة بين العوامل التي تم دراستها.

الجدول.V.2: مصفوفة تصميم BBD وقيم نسبة السكر في عصير التمر ومردود استخلاصه المتوقعة والمتحصل عليها.

التجارب	العوامل المؤثرة			الإستجابة 2		الإستجابة 1	
	m/v	T°ex	tex	m/m	FITS2	R%	FITS1
1	0,1	20	35	0,85	0,831	8,5	7,90625
2	0,55	20	35	0,513	0,515	28,25	28,40625
3	0,1	80	35	0,775	0,773	7,75	7,59375
4	0,55	80	35	0,481	0,5	26,5	27,09375
5	0,1	50	10	0,735	0,75775	7,25	7,90625
6	0,55	50	10	0,513	0,51475	28,25	28,15625
7	0,1	50	60	0,825	0,82325	8,25	8,34375
8	0,55	50	60	0,5	0,47725	28,75	28,09375
9	0,325	20	10	0,61	0,60625	20,25	20,1875
10	0,325	80	10	0,551	0,53025	18,75	18,25
11	0,325	20	60	0,56	0,58075	18,75	19,25
12	0,325	80	60	0,58	0,58375	19,5	19,5625
13	0,325	50	35	0,59	0,60533333	19,75	20,0833333
14	0,325	50	35	0,613	0,60533333	20,25	20,0833333
15	0,325	50	35	0,613	0,60533333	20,25	20,0833333

### تحديد التأثيرات والمعاملات الهامة للنموذج

طبق تحليل التباين (ANOVA) لتحديد التأثير الهام للتغيرات الأساسية الفردية والمتداخلة على تحسين نسبة السكر في عصير التمر ومردود استخلاصه، تم تقييم صلاحية النموذج الذي تم إنشاؤه باستخدام تحليل التباين والتباين الشامل، وهو طريقة إحصائية تقسم التباين الكلي لمعاملات الإدخال إلى عدة وحدات مرتبطة بمصادر تباين محددة وتستخدم لاختبار الفرضيات حول العناصر ذات الأهمية، وقد تم تطبيقه لدراسة كيفية تضافر إعدادات العوامل الرئيسية للتأثير على نسبة السكر في عصير التمر ومردود استخلاصه. من خلال تحديد قيم العامل P، والتي يجب أن تكون أقل من 0.05 عند مستوى الثقة 95% لتكون ذات دلالة إحصائية. يمكن استخدام المعادلة (3) والمعادلة (4) للتعبير عن العلاقة بين معاملات الإدخال والنتيجة المتوقعة بعد استبدال المتغيرات (i) بقيمتها (R%) و ( $m_{sucre}/m_{datte}$ ). تم تحليل قيم الاستجابة لتحسين العوامل، تعبر المعادلة (3) والمعادلة (4) عن النموذج متعدد الحدود الناتج.

معادلتى الانحدار بالوحدات غير المشفرة 

$$\begin{aligned}
 R\% &= 0,99 + 69,68 \text{ m/v} + 0,0359 \text{ T}^\circ\text{ex} - 0,0044 \text{ tex} - 34,77 \text{ m/v}^*\text{m/v} \\
 &- 0,000637 \text{ T}^\circ\text{ex}^*\text{T}^\circ\text{ex} \\
 &- 0,000317 \text{ tex}^*\text{tex} - 0,0370 \text{ m/v}^*\text{T}^\circ\text{ex} - 0,0222 \text{ m/v}^*\text{tex} \\
 &+ 0,000750 \text{ T}^\circ\text{ex}^*\text{tex}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{m/m} &= 0,8133 - 1,066 \text{ m/v} + 0,00135 \text{ T}^\circ\text{ex} + 0,00211 \text{ tex} + 1,016 \text{ m/v}^*\text{m/v} \\
 &- 0,000022 \text{ T}^\circ\text{ex}^*\text{T}^\circ\text{ex} \\
 &- 0,000022 \text{ tex}^*\text{tex} - 0,00100 \text{ m/v}^*\text{T}^\circ\text{ex} - 0,00458 \text{ m/v}^*\text{tex} + 0,000022 \text{ T}^\circ\text{ex}^*\text{tex}
 \end{aligned}$$

في حالة اعتماد نسبة السكر في عصير التمر كإستجابة كانت تأثيرات عوامل التشغيل وتداخلاتها ذات دلالة إحصائية بمجال ثقة يزيد عن 95%، وبلغت قيمة  $R^2$  (99,72)، حيث كانت قيمة  $R^2$  ajust (99,21) و  $R^2$  préd(95,76) مما يشير إلى أن المصطلحات التي تم قياسها في النموذج ملحوظة بما يكفي لعمل نتائج مرضية، بالإضافة إلى ذلك فإن قيمة F الجيدة (196,27) تؤكد أهمية النموذج المتوقع انظر الجدول (3.V).

اما بالنسبة للإستجابة الثانية المتمثلة في مردود الاستخلاص فقد كانت تأثيرات عوامل التشغيل وتداخلاتها ذات دلالة إحصائية أيضا بمجال ثقة يزيد عن 95%، وبلغت قيمة  $R^2$  (98,9)، حيث كانت قيمة  $R^2$  ajust (96,91) و  $R^2$  préd(85,13) مما يشير إلى أن المصطلحات التي تم قياسها في النموذج ملحوظة بما يكفي لعمل نتائج مرضية، بالإضافة إلى ذلك فإن قيمة F الجيدة (49,74) تؤكد أهمية النموذج المتوقع انظر الجدول (4.V).

الجدول V.3: معاملات الانحدار المقدرة لتحسين نسبة السكر في عصير التمر

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	T-Value	P-Value
Constant	—	—	—	—	51,21	—
Model	9	815,126	90,570	196,27	—	0,000
Linear	3	801,391	267,130	578,88	—	0,000
m/v	1	800,000	800,000	1733,63	41,64	0,000
T°ex	1	1,320	1,320	2,86	-1,69	0,152
tex	1	0,070	0,070	0,15	0,39	0,712
Square	3	12,157	4,052	8,78	—	0,019
m/v*m/v	1	11,443	11,443	24,80	-4,98	0,004
T°ex*T°ex	1	1,212	1,212	2,63	-1,62	0,166
tex*tex	1	0,145	0,145	0,31	-0,56	0,600
2-Way Interaction	3	1,578	0,526	1,14	—	0,418
m/v*T°ex	1	0,250	0,250	0,54	-0,74	0,495
m/v*tex	1	0,063	0,063	0,14	-0,37	0,728
T°ex*tex	1	1,266	1,266	2,74	1,66	0,159
Error	5	2,307	0,461	—	—	—
Lack-of-Fit	3	2,141	0,714	8,56	—	0,106
Pure Error	2	0,167	0,083	—	—	—
Total	14	817,433	—	—	—	—
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	—	—	—
0,679307	99,72%	99,21%	95,76%	—	—	—

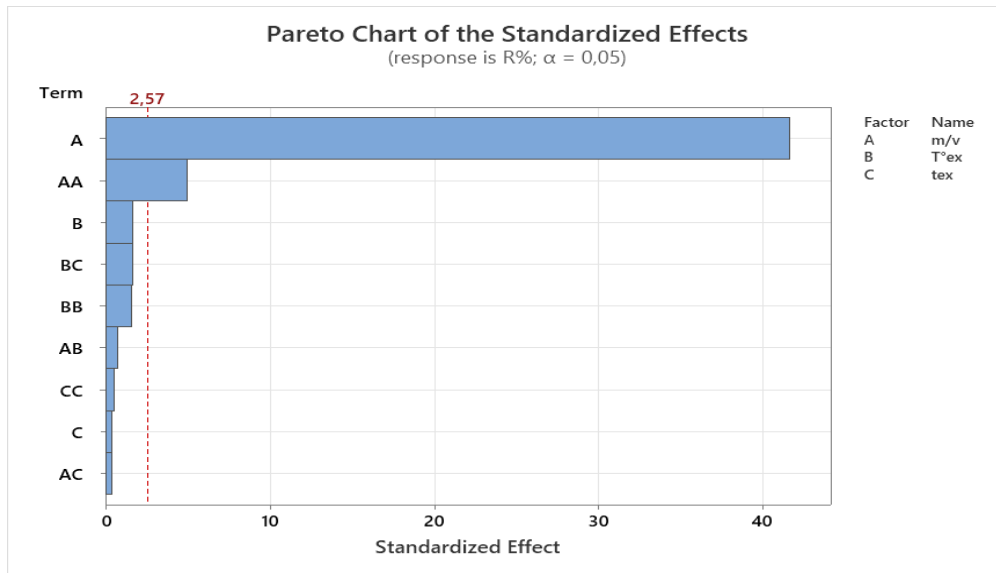
الجدول V.4: معاملات الانحدار المقدرة لتحسين مردود إستخلاص التمر.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	T-Value	P-Value
constant					53,59	
Model	9	0,171388	0,019043	49,74		0,000
Linear	3	0,154668	0,051556	134,67		0,000
m/v	1	0,153458	0,153458	400,85	-20,02	0,000
T°ex	1	0,000968	0,000968	2,53	-1,59	0,173
tex	1	0,000242	0,000242	0,63	0,80	0,463
Square	3	0,012763	0,004254	11,11		0,012
m/v*m/v	1	0,009777	0,009777	25,54	5,05	0,004
T°ex*T°ex	1	0,001410	0,001410	3,68	-1,92	0,113
tex*tex	1	0,000677	0,000677	1,77	-1,33	0,241
2-Way Interaction	3	0,003957	0,001319	3,45		0,108
m/v*T°ex	1	0,000182	0,000182	0,48	-0,69	0,521
m/v*tex	1	0,002652	0,002652	6,93	-2,63	0,046
T°ex*tex	1	0,001122	0,001122	2,93	1,71	0,148
Error	5	0,001914	0,000383			
Lack-of-Fit	3	0,001562	0,000521	2,95		0,263
Pure Error	2	0,000353	0,000176			
Total	14	0,173302				
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)			
0,0195661	98,90%	96,91%	85,13%			

### 2.1.V. مخطط باريتو

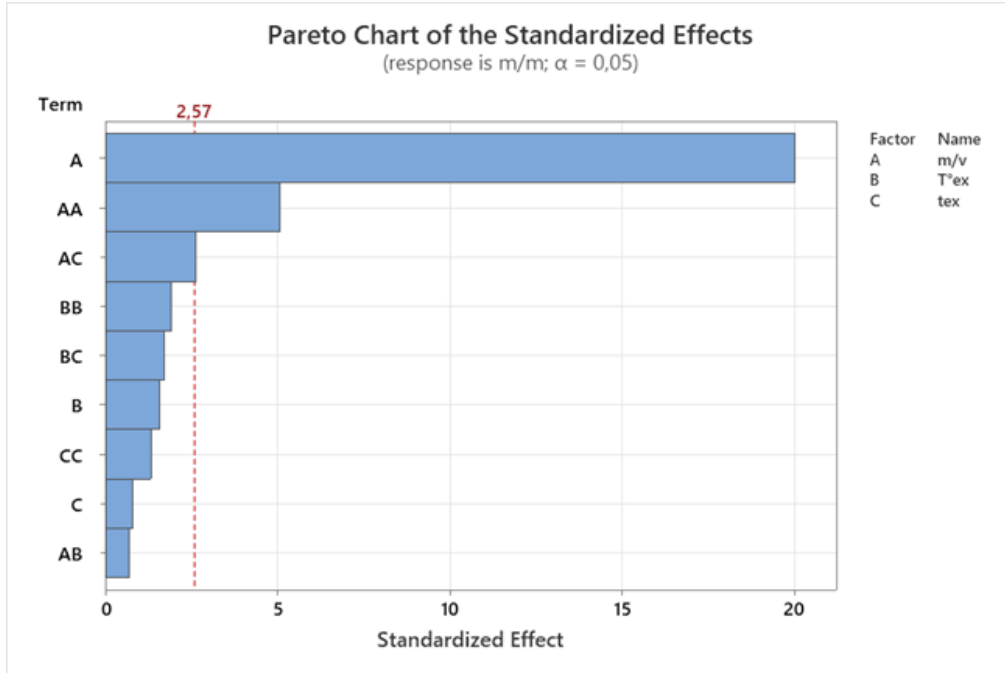
نظرا لإمكانية ظهور تأثير المكونات الرئيسية وعلاقتها على الاستجابة المحددة، فإن مخطط باريتو هو جزء مفيد جدًا من حيث المعلومات في دراسة التصميم. تم رسم كل تأثير أفقياً على مخطط باريتو بمستوى ثقة 95% وقيمة T-Value تساوي 51,21 بالنسبة للإستجابة الأولى (R%) و 53,59 بالنسبة للإستجابة الثانية ( $m^{sucre}/m_{datte}$ )، تم إجراء اختبار T-Value للتحقق مما إذا كانت تختلف اختلافاً كبيراً عن الصفر.

يوضح الشكل (1.V) أن الأشرطة التي تمثل العوامل النسبة بين كتلة التمروحم الماء ( $\frac{m}{V}$ ) و ( $\frac{m}{V} * \frac{m}{V}$ ) على مخطط باريتو تتقاطع مع الخط المرجعي عند 2,57، مع الشروط الهامة للنموذج الحالي، هذه التأثيرات إحصائية بمستوى ثقة 95%. لا يمكن تحديد ما إذا كان تأثير العامل يزيد أو يقلل من نسبة السكر في عصير التمر (R%)، حيث يمثل هذا الرقم قيمة التأثير المطلق الذي تم تحديده من أكبر تأثير إلى أصغر تأثير.



الشكل 1.V: مخطط باريتو للتأثيرات الفردية والمتداخلة للإستجابة الأولى.

يوضح الشكل (2.V) أن الأشرطة التي تمثل العوامل النسبة بين كتلة التمر والماء المقطر ( $\frac{m}{V}$ )، و ( $\frac{m}{V} * \frac{m}{V}$ ) و ( $\frac{m}{V} * t_{ex}$ ) على مخطط باريتو تتقاطع مع الخط المرجعي عند 2,57، مما يعني ان هذه العوامل لها تأثير واضح على مردود استخلاص السكر ، كما لوحظ ان العوامل المذكورة تتميز بتأثيرات إحصائية بمستوى ثقة يفوق 95%. الا انه لا يمكن تحديد ما إذا كان تأثير العامل يزيد أو يقلل من مردود استخلاص التمر ( $m^{sucre}/m_{datte}$ )، حيث يمثل هذا الرقم قيمة التأثير المطلق الذي تم تحديده من أكبر تأثير إلى أصغر تأثير.



الشكل.V.2: مخطط باريتو للتأثيرات الفردية والمتداخلة للإستجابة الثانية.

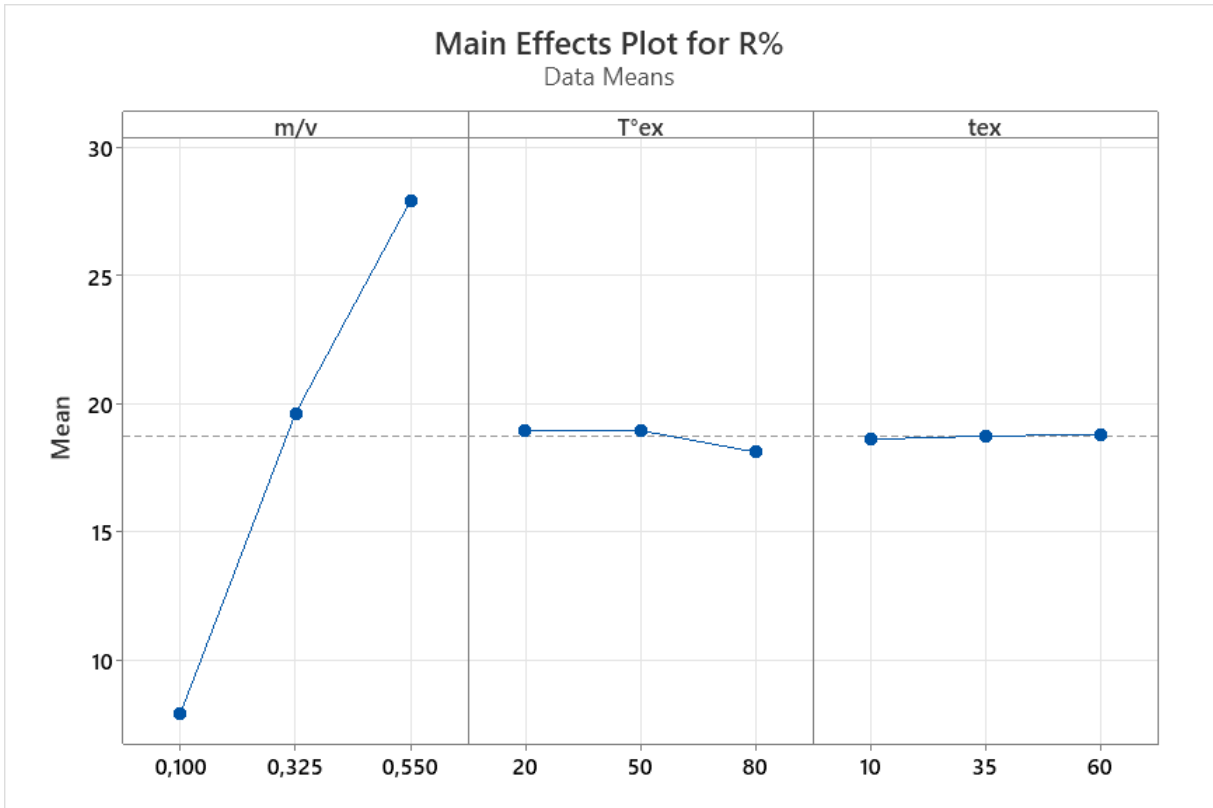
### 3.1.V. تأثير العوامل الفردية على نسبة السكر في عصير التمر

أظهرت منحنيات التغيرات الفردية للعوامل الأساسية أن:

عامل النسبة بين كتلة التمر و حجم الماء له تأثير جد واضح كما هو مبين من خلال إنحراف منحناها من منخفض (-1) إلى مرتفع (1)، ويظهر العامل تأثيرا إيجابيا على نسبة السكر في عصير التمر، وتم العثور على قيمة P ذات دلالة إحصائية عالية والتي كانت أقل بكثير من 0,05.

أما بالنسبة لعامل درجة حرارة الإستخلاص، فتأثيره طفيف إذ أن رفع درجة الحرارة من 20°C إلى 80°C لم يُحسن بشكل واضح استخلاص السكر. بل قد يؤدي إلى تحلل بعض السكريات أو تفاعلات جانبية (مثل التكرمل أو التفاعلات مع مكونات أخرى) مما يُفسر التراجع الطفيف .

وحتى الزيادة في زمن الإستخلاص (من 10 إلى 60 دقيقة) لم تحدث فرقا واضحا في نسبة السكر أي أن الزمن له تأثير ضعيف أو غير ملحوظ على نسبة السكر في الظروف المدروسة. مما يعني أن العاملين لها تأثير مهمل وهذا ما تؤكدُه قيمة P التي كانت أكبر بكثير من 0,05.



الشكل 3.V: منحنيات التأثيرات الرئيسية للإستجابة الأولى.

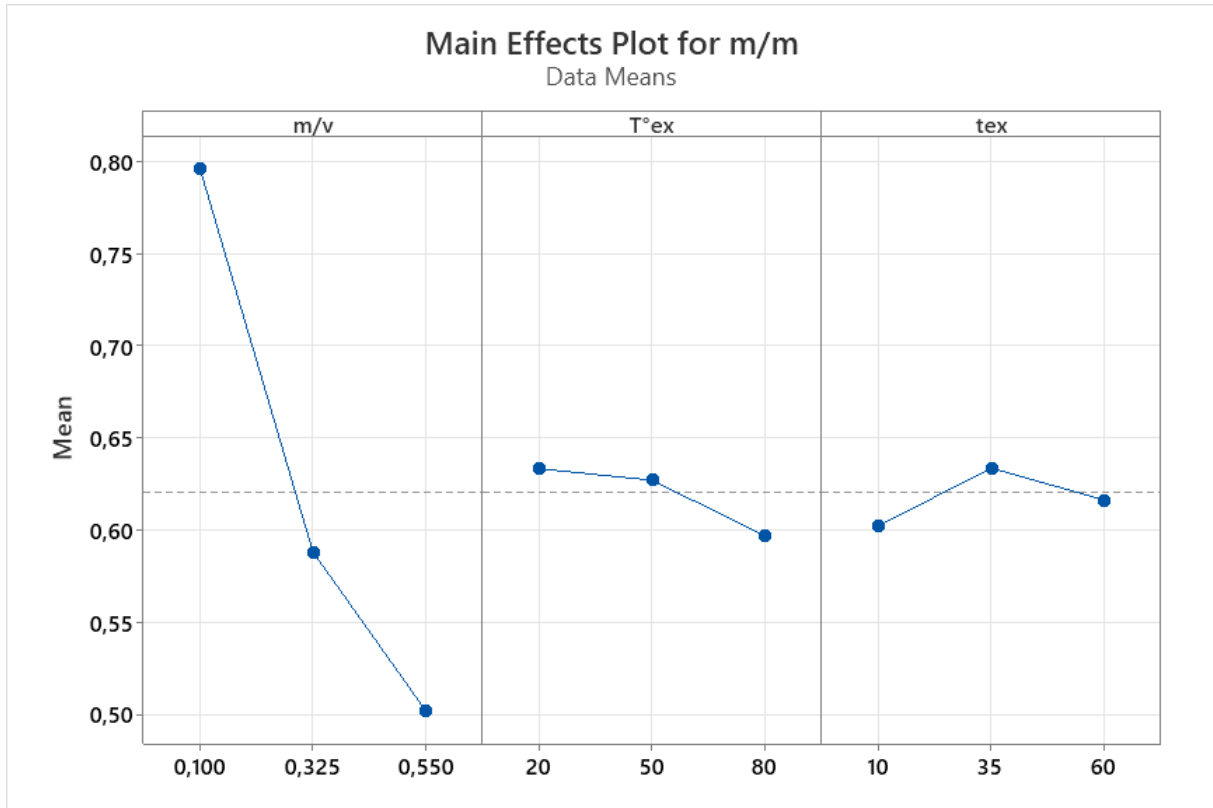
#### 4.1.V. تأثير العوامل الفردية على مردود استخلاص التمر

أظهرت منحنيات التغيرات الفردية للعوامل الأساسية أن:

عامل النسبة بين كتلة التمر والماء المقطر يتميز بأعلى التأثيرات ذات الدلالة كما هو موضح من خلال انحراف منحناها انحرافا كبيرا إذ نلاحظ انخفاضاً حاداً في النسبة السكرية مع زيادة النسبة (m/v)، وتم الحصول على قيمة p ذات دلالة إحصائية عالية، والتي كانت مساوية للصفر.

أما بالنسبة لعامل درجة حرارة الإستخلاص، فقد سجلت أعلى نسبة عند 20 درجة مئوية، ثم حدث انخفاض طفيف ثم ثبات أي أنها لم تكن ذات تأثير كبير.

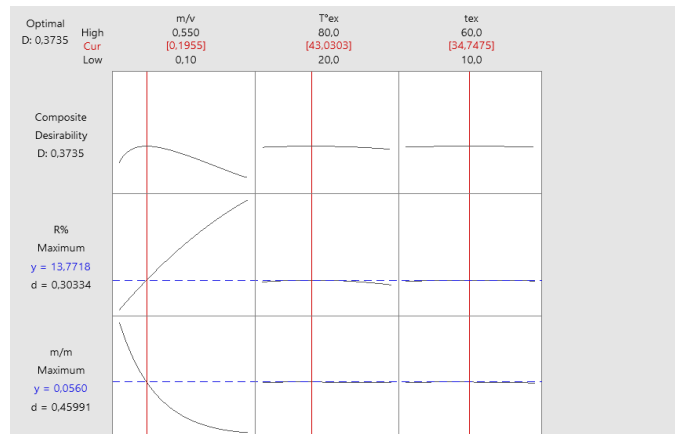
حتى الزيادة في عمل زمن الإستخلاص (من 10 إلى 60 دقيقة) لم تحدث فرقا واضحا في مردود استخلاص السكر مما يعني أن العاملين لها تأثير محتمل وهذا ما تؤكدته قيمة P التي كانت أكبر بكثير من 0,05.



الشكل.V.4: منحنيات التأثيرات الرئيسية للإستجابة الثانية.

### 5.1.V. تحديد الشروط المثلى عند دمج الاستجابتين

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تحديد الشروط المثلى لاستخلاص أكبر كمية ممكنة من السكر المقابلة لواحد غرام من التمر على أن يكون تركيزه عاليا في العصير، وهذا للحصول على كمية معتبرة من الايثانول. ولتحقيق هذه الغاية تم دمج الاستجابتين لتحديد الشروط المثلى لهذه العملية.



الشكل.V.5: تحديد الشروط المثلى للترسيب.

6.1.V. تحسين الاستجابة

يعد تحسين الاستجابة خيارا أساسيا للحصول على أفضل تداخل بين العوامل المدروسة وهذا بهدف الحصول على أكبر قيمة ممكنة للإستجابة المختارة، يوضح الرسم البياني كيفية تأثير العوامل على الاستجابات المثلى المتوقعة (Y). بالإضافة إلى ذلك، تم تطبيق تقنية الدالة المرغوبة المركبة (D) لتقييم تأثير العوامل المدروسة مثل النسبة بين كتلة التمر وحجم الماء ( $\frac{m}{V}$ ) ، درجة حرارة الاستخلاص  $T_{ex}$ ، و زمن الاستخلاص  $t_{ex}$ . وتظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن أقصى قيمة للإستجابة الأولى R بلغت 13,77% وأقصى قيمة للإستجابة الثانية ( $m_{sucrose}/m_{datte}$ ) بلغت 0,056 مع نسبة بين كتلة التمر وحجم الماء ( $\frac{m}{V}$ ) بلغت 0,1955، درجة حرارة الإستخلاص  $43,03^{\circ}C$  وزمن إستخلاص 34,74min.

الجدول 5.V: قيم الإستجابة Y التي تم الحصول عليها في الشروط المثلى.

العوامل	الرمز	المستوى	القيمة المثلى	الدالة المرغوب فيها D
زمن الاستخلاص	$t_{ex}$	-0,007	34,74	D=0,3735
درجة حرارة الاستخلاص	$T_{ex}$	-0,23	43,03	
كتلة التمر حجم الماء	$\frac{m}{v}$	-0,577	0,1955	
الاستجابة المثلى المتوقعة 1	(%R)	/	13,77	
الاستجابة المثلى المتوقعة 2	$(m_{sucrose}/m_{datte})$	/	0,056	

2.V. اختيار نموذج التحسين

اخترنا في هذه الدراسة العمل مع تصاميم (Box-Behnken BBD)، والتي يتم من خلالها تغيير جميع العوامل من تجربة إلى أخرى من أجل تقدير تأثيراتها المختلفة، بعبارة أخرى ندرس تأثير أحد العوامل بتغيير العوامل الأخرى في الاستجابة، تكمن مزايا التصاميم المعمول بها بشكل أساسي في انخفاض تكلفتها، انخفاض عدد التجارب، ودراسة التداخلات المحتملة بين العوامل. يتألف تصميم بوكس-بهنكن (BBD) من  $2^k$  تجربة (k: تمثل العوامل الأربعة في التجربة، 2: عدد مستويات كل تجربة)، وهو مفيد جدًا للدراسات الأولية أو لمرحلة التحسين. في دراستنا هذه، تم استخدام تصميم تجريبي كامل مكون من 27 تجربة لدراسة أهمية العوامل الفيزيوكيميائية (كمية الحميرة  $m_I$ ، كمية أنوية التمر  $m_{nd}$ ، درجة الحموضة pH و زمن التخمر  $t_f$ )، في تحسين مردود إنتاج الإيثانول ( $\frac{m_{Etha}}{m_{datte}}$ ). يوضح الجدول (6.V) عوامل الإدخال ومستوياتها.

في التجربة. ولدراسة التداخلات المختلفة بين العوامل الفيزيوكيميائية التي تؤثر على التفاعل، استخدمنا طريقة التصميم التجريبي بأربعة عوامل مستقلة بمستويات مختلفة، بما في ذلك كمية الخميرة  $m_I$ ، كمية أنوية التمر  $m_{nd}$ ، درجة الحموضة pH و زمن التخمر  $t_f$  مع التكرارات الثلاثة في النقطة المركزية.

الجدول.V.6: المستويات المختلفة للعوامل التي تم العمل بها في دراسة مردود إنتاج الإيثانول.

العوامل	الوحدة	الرمز	المستوى الأدنى (-1)	النقطة المركزية	المستوى الأعلى (+1)
كمية الخميرة	$\frac{g}{l}$	$m_I$	0,25	1,625	3
كمية أنوية التمر	$\frac{g}{l}$	$m_{nd}$	0	1,5	3
درجة الحموضة	/	pH	3	4,5	6
زمن التخمر	h	$t_f$	20	46	72

في هذه الدراسة، تم اختيار مردود إنتاج الإيثانول ( $\frac{m_{Etha}}{m_{datte}}$ ) كاستجابة (Y) للحصول على الشروط المثلى للعوامل، تم تحليل البيانات باستخدام البرنامج الإحصائي Minitab22، والذي استعمل لاستنتاج التغييرات الأساسية الفردية والتغييرات الأساسية المتداخلة بين مختلف العوامل المدروسة [3,1]. في هذه الدراسة، تم إعطاء العدد الإجمالي للتجارب التي أجريت من خلال هذه المعادلة:

$$N^{br}_{exp} = 2^E + P \quad (Eq.V.5)$$

حيث:

E : عدد العوامل المدروسة.

P: عدد نقاط المركز المطبقة لاختبار الحدود التريبعية بين المستويات المنخفضة والعالية.

وتستخدم النقاط المركزية لتقدير وضوح وانحناء النموذج المطبق. وهكذا، تم إجراء 27 تجربة في هذه الدراسة، بما في ذلك مجموعة من مستويات العوامل المدروسة كما هو موضح في الجدول (6.V). يمكن تطبيق نتائج التصميم المشار إليه من حيث نموذج الانحدار والاستجابة النظرية الجدول (6.V)، من خلال المعادلة التالية:

$$(y) = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k a_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (Eq.V.6)$$

حيث:

$\epsilon$ : هو الحد المتبقي.

$a_0$ : هو متوسط قيمة النتيجة.

$a_j$ : هو المعاملات الخطية.

$a_{ijk}$  و  $a_{ij}$ : يرمز إلى معاملات التفاعل بين العوامل المدروسة.

$X_j, X_k, X_i$ : العوامل المستقلة.

تم استخدام برنامج Minitab 22 الإحصائي لنظام ويندوز لإنشاء تصميم التجارب (DoE) وتحليل البيانات المتحصل عليها، باعتماد اختبار F و p-value لتحليل المعاملات واستخدام معادلة رياضية من الدرجة الثانية لحساب معاملات الانحدار، استخدم اختبار عدم التطابق لتقييم مدى التوافق مع النماذج الرياضية، تم التحقق من الدلالة الإحصائية للنموذج باستخدام اختبار F-test. تم تطبيق التمثيل البياني لسطح الاستجابة لتوضيح تأثيرات العوامل المستقلة على الاستجابات المختارة واختيار أفضل نموذج على أساس أعلى قيم  $R^2$ ، ويجب أن تكون قيم p أقل من 0.05.

### 1.2.V. تصميم نموذج بوكس-بهنكن الكامل $2^4$

تم إجراء تحسين التصميم التجريبي لنموذج بوكس-بهنكن الكامل في شكل مصفوفة من 27 تجربة لمستويات مختلفة من العوامل المدروسة ومردود إنتاج الإيثانول التي تم الحصول عليها والتنبؤ بها، كما هو موضح في الجدول (7.V) وتظهر النتائج التي تم الحصول عليها بوضوح أن مردود إنتاج الإيثانول ( $\frac{m_{Etha}}{m_{datte}}$ ) تراوح بين 0,233 إلى 0,384 ؛ ويمكن اعتبار هذه المساحة التجريبية كافية ميزة لدراستنا حيث يمكن أن تحتوي على الشروط المثلى المطلوبة، وباستخدام هذه النتائج يمكننا تقدير التغييرات الأساسية الفردية والتغييرات الأساسية المتداخلة بين العوامل التي تم دراستها.

الجدول.V.7: مصفوفة تصميم BBD وقيم مردود انتاج الإيثانول المتوقعة والمتحصل عليها.

N° d'exp	العوامل				الإستجابة	
	pH	m <sub>L</sub>	tf	m(nd)	(m <sub>Etha</sub> /m <sub>dat</sub> ) <sub>exp</sub>	oé(m <sub>Etha</sub> /m <sub>datte</sub> ) <sub>th</sub>
1	3	0,25	46	1,5	0,233	0,23316667
2	6	0,25	46	1,5	0,276	0,27633333
3	3	3	46	1,5	0,291	0,293
4	6	3	46	1,5	0,296	0,29816667
5	4,5	1,625	20	0	0,283	0,28483333
6	4,5	1,625	72	0	0,36	0,36066667
7	4,5	1,625	20	3	0,291	0,29266667
8	4,5	1,625	72	3	0,362	0,3625
9	3	1,625	46	0	0,276	0,27491667
10	6	1,625	46	0	0,288	0,28508333
11	3	1,625	46	3	0,261	0,26575
12	6	1,625	46	3	0,301	0,30391667
13	4,5	0,25	20	1,5	0,283	0,27758333
14	4,5	3	20	1,5	0,277	0,28541667
15	4,5	0,25	72	1,5	0,324	0,31741667
16	4,5	3	72	1,5	0,384	0,39125
17	3	1,625	20	1,5	0,202	0,19791667
18	6	1,625	20	1,5	0,255	0,25258333
19	3	1,625	72	1,5	0,303	0,30125
20	6	1,625	72	1,5	0,295	0,29491667
21	4,5	0,25	46	0	0,307	0,31558333
22	4,5	3	46	0	0,364	0,35691667
23	4,5	0,25	46	3	0,318	0,32091667
24	4,5	3	46	3	0,374	0,36125
25	4,5	1,625	46	1,5	0,352	0,351
26	4,5	1,625	46	1,5	0,351	0,351
27	4,5	1,625	46	1,5	0,35	0,351

### تحديد التأثيرات والمعاملات الهامة للنموذج

طبق تحليل التباين (ANOVA) لتحديد التأثير الهام للتغيرات الأساسية الفردية والمتداخلة على تحسين مردود انتاج الإيثانول، تم تقييم صلاحية النموذج الذي تم إنشاؤه باستخدام تحليل التباين والتباين الشامل، وهو طريقة إحصائية تقسم التباين الكلي لمعاملات الإدخال إلى عدة وحدات مرتبطة بمصادر تباين محددة وتستخدم لاختبار الفرضيات حول العناصر ذات الأهمية، وقد تم تطبيقه لدراسة كيفية تضافر إعدادات العوامل الرئيسية للتأثير على مردود انتاج الإيثانول. من خلال تحديد قيم  $p$  والتي يجب أن تكون أقل من 0.05 عند مستوى الثقة 95% لتكون ذات دلالة إحصائية. يمكن استخدام المعادلة (3) للتعبير عن العلاقة بين معاملات الإدخال والنتيجة المتوقعة بعد استبدال المتغيرات (i) بقيمها  $\left(\frac{m_{Etha}}{m_{datte}}\right)$ . تم تحليل قيم الاستجابة لتحسين العوامل، تعبر المعادلة (3) عن النموذج متعدد الحدود الناتج.

### معادلة الانحدار بالوحدات غير المشفرة

$$\begin{aligned} m_{Etha}/m_{dat} = & -0,5218 + 0,2930 \text{ pH} + 0,0314 m_L + 0,005638 t_f - 0,00703 m_{(nd)} \\ & - 0,02935 \text{ pH} * \text{pH} \\ & - 0,00518 m_L * m_L - 0,000034 t_f * t_f - 0,00113 m_{(nd)} * m_{(nd)} - 0,00461 \text{ pH} * m_L \\ & - 0,000391 \text{ pH} * t_f + 0,00311 \text{ pH} * m_{(nd)} + 0,000462 m_L * t_f - 0,00012 m_L * m_{(nd)} \\ & - 0,000038 t_f * m_{(nd)} \end{aligned}$$

كانت تأثير معاملات التشغيل وتداخلاتها ذات دلالة إحصائية بمجال ثقة يزيد عن 95%، وبلغت قيمة  $R^2$  (98,90%)، حيث كانت قيمة  $R^2$  ajust (97,61%) و  $R^2$  préd (93,66%) مما يشير إلى أن المصطلحات التي تم قياسها في النموذج ملحوظة بما يكفي لعمل نتائج مرضية، بالإضافة إلى ذلك فإن قيمة F الجيدة (76,91) تؤكد أهمية النموذج المتوقع كما هو موضح في الجدول (8.V).

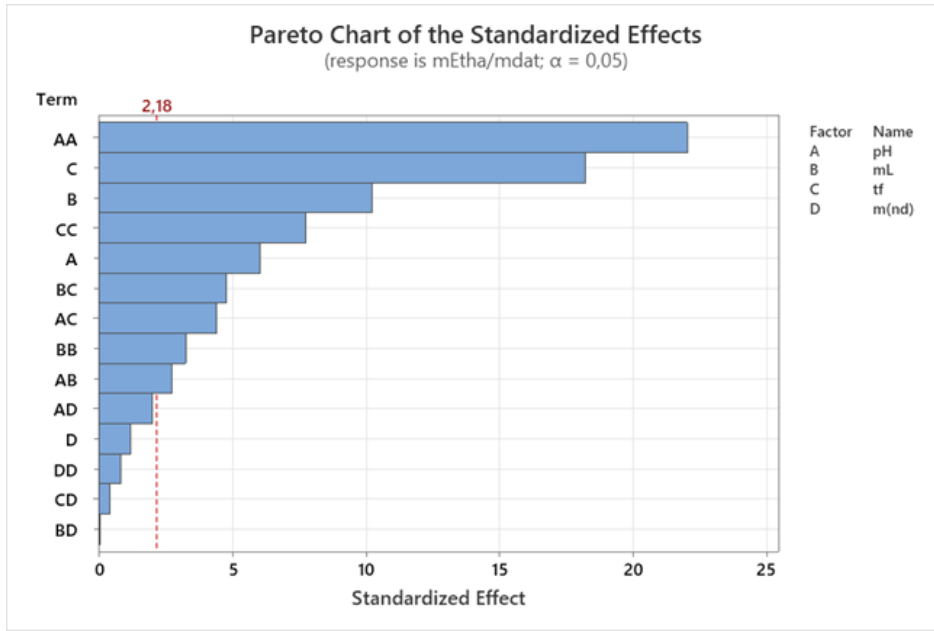
الجدول.V.8 : معاملات الانحدار المقدرة لتحسين مردود انتاج الإيثانول .

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	F-Value	VIF
Model	-	-	-	0,000	76,91	
Constant	0,35100	0,00400	87,83	0,000		
pH	0,01208	0,00200	6,05	0,000	36,57	1,00
m <sub>L</sub>	0,02042	0,00200	10,22	0,000	104,39	1,00
t <sub>f</sub>	0,03642	0,00200	18,22	0,000	332,12	1,00
m <sub>(nd)</sub>	0,00242	0,00200	1,21	0,250	1,46	1,00
pH*pH	-0,06604	0,00300	-22,03	0,000	485,45	1,25
m <sub>L</sub> *m <sub>L</sub>	-0,00979	0,00300	-3,27	0,007	10,67	1,25
t <sub>f</sub> *t <sub>f</sub>	-0,02329	0,00300	-7,77	0,000	60,38	1,25
m <sub>(nd)</sub> *m <sub>(nd)</sub>	-0,00254	0,00300	-0,85	0,413	0,72	1,25
pH*m <sub>L</sub>	-0,00950	0,00346	-2,74	0,018	7,53	1,00
pH*t <sub>f</sub>	-0,01525	0,00346	-4,41	0,001	19,41	1,00
pH*m <sub>(nd)</sub>	0,00700	0,00346	2,02	0,066	4,09	1,00
m <sub>L</sub> *t <sub>f</sub>	0,01650	0,00346	4,77	0,000	22,73	1,00
m <sub>L</sub> *m <sub>(nd)</sub>	-0,00025	0,00346	-0,07	0,944	0,01	1,00
t <sub>f</sub> *m <sub>(nd)</sub>	-0,00150	0,00346	-0,43	0,672	0,19	1,00
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)			
0,0069222	98,90%	97,61%	93,66%			

## 2.2.V. مخطط باريتو

نظراً لإمكانية ظهور تأثير المكونات الرئيسية وعلاقتها على الاستجابة المحددة، فإن مخطط باريتو هو جزء مفيد جداً من المعلومات في دراسات التصميم. تم رسم كل تأثير أفقياً على مخطط باريتو بمستوى ثقة 95% وقيمة t تساوي 87,83 ، وتم إجراء اختبار t للتحقق مما إذا كانت تختلف اختلافاً كبيراً عن الصفر.

يوضح الشكل (6.V) أن الأشرطة التي تمثل العوامل كمية الخميرة m<sub>L</sub>، كمية أنوية التمر m<sub>nd</sub>، درجة الحموضة pH و زمن التخمر t<sub>f</sub>، pH\*pH ، pH\*m<sub>L</sub>، t<sub>f</sub>\*t<sub>f</sub> ، m<sub>L</sub>\*t<sub>f</sub> على مخطط باريتو تتقاطع مع الخط المرجعي عند 2.18، مع الشروط الهامة للنموذج الحالي، هذه التأثيرات إحصائية بمستوى ثقة 95% . لا يمكن تحديد ما إذا كان تأثير العامل يزيد أو يقلل من مردود انتاج الإيثانول (R%)، حيث يمثل هذا الرقم قيمة التأثير المطلق الذي تم تحديده من أكبر تأثير إلى أصغر تأثير.



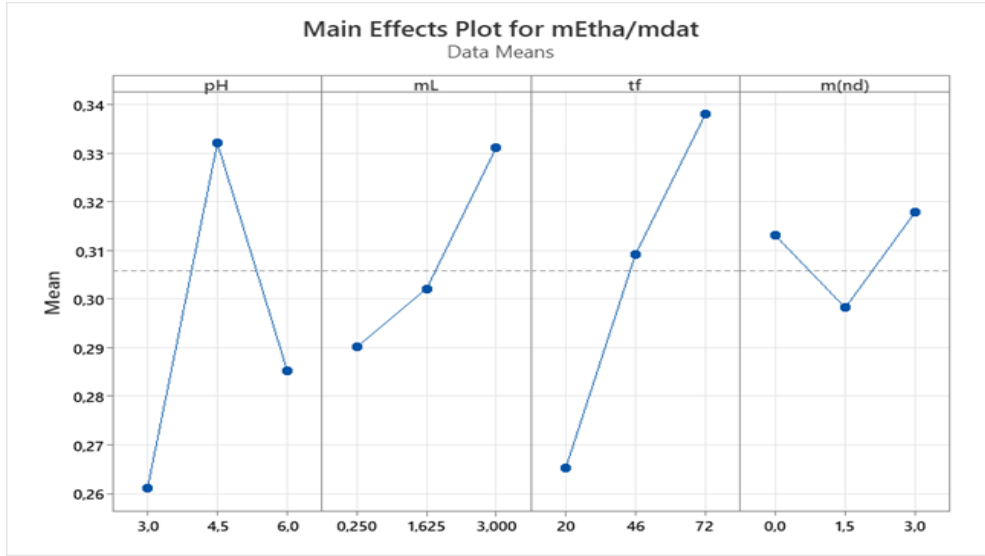
الشكل.V.6: مخطط باريتو للتأثيرات الفردية والمتداخلة.

### 3.2.V. تأثير العوامل الفردية على مردود انتاج الإيثانول

يتبين من خلال منحنيات التغييرات الأساسية الفردية لعملية التخمير الخاصة بتأثير كل من عامل زمن التخمير وكمية الخميرة أنها تتميز بتأثير واضح جدا ، كما هو موضح من خلال انحراف منحنيهما من القيمة الدنيا (-1) إلى الأعلى (+1)، يُظهر كلا العاملين تأثيرًا إيجابيًا على عملية التخمير ، وتم الحصول على قيم p ذات دلالة إحصائية عالية، والتي كانت أقل بكثير من 0.05، نلاحظ كذلك أن الزيادة في زمن التخمير يؤدي الى الزيادة حادة في مردود انتاج الإيثانول ثم تتباطئ نوعا ما بعد مرور 46 ساعة من التفاعل وذلك راجع إلى تناقص تركيز السكريات أو تراكم الإيثانول الذي يبدأ في تثبيط نشاط الخميرة و بداية تخريبها.

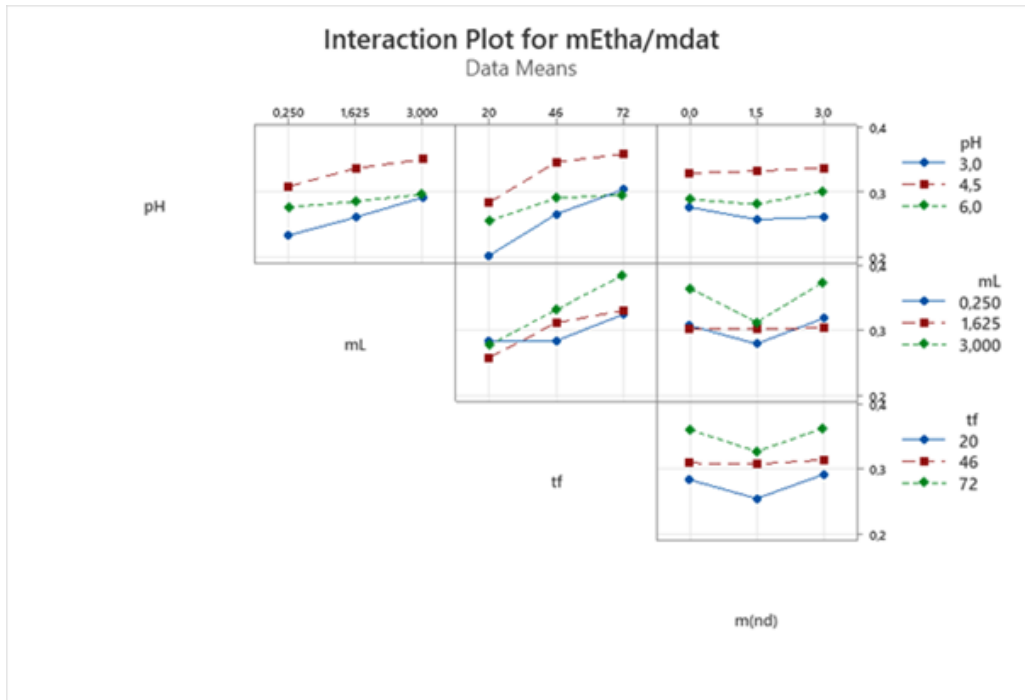
بينما في حالة تأثير كمية الخميرة على عملية التخمير لعبت دورًا مهمًا في تعزيز الإنتاج، حيث سجلت الزيادة المنتظمة في الكمية تحسنًا تدريجيًا في مردود الإيثانول. أعلى قيمة سُجلت عند 3.0 مل، ما يشير إلى أن زيادة عدد الخلايا الخميرية يسهم مباشرة في تحسين الأداء الحيوي لعملية التحلل والتخمير.

الشكل 7.V: منحنيات التأثيرات الرئيسية للاستجابات.



4.2.V آثار التداخل بين العوامل المدروسة

يوضح الشكل (8.V) التأثيرات التداخلية بين المستويات الدنيا والعليا لعوامل الأربعة التي تم دراستها.

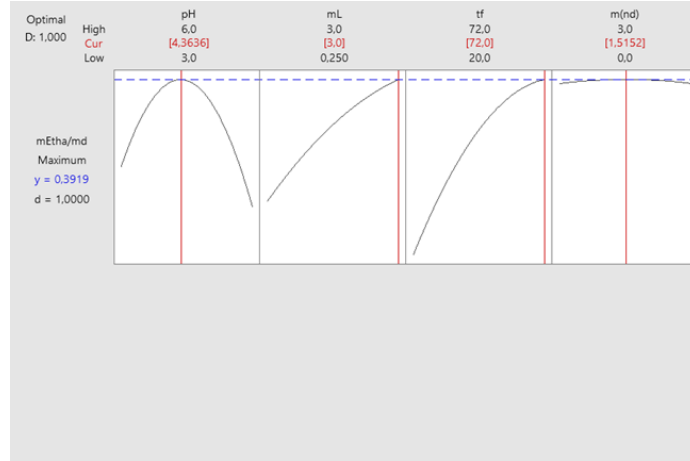


الشكل 8.V: نتائج التداخل بين العوامل المدروسة على مردود انتاج الإيثانول.

إن التداخلات بين (pH\*mL)، (pH\*tf)، (pH\*tf)، (mL\*tf)، (pH\*PH)، (tf\*tf)، (mL\*mL) لها تأثيرات كبيرة جدًا، تصل إلى -0,00461 ، -0,000391 ، +0,000462 ، -0,02935 ، -0,000034 ، -0,00518 على التوالي ، مع قيم p ذات دلالة إحصائية أقل من 0,05 ، والتي تمنحها الحدود غير المتوازية لمخططات التأثير، كما هو موضح في الشكل (8.V) يتناسب مخطط باريتو مع هذه الملاحظة.

### 5.2.V. تحديد الشروط المثلى

في هذه الدراسة تمحور الهدف الرئيسي من منهجية التحسين حول تحديد الظروف المثلى التي تساهم في الحصول على أكبر مردود للإيثانول، حيث تم اعتماد مردود الإيثانول كمتغير استجابة، مع السعي إلى تحقيق أعلى قيمة ممكنة له لضمان كفاءة عالية في عملية التخمير الشكل (9.V)



الشكل 9.V: تحديد الشروط المثلى لعملية التخمير.

### 6.2.V. تحسين الاستجابة

يعد تحسين الاستجابة خياراً أساسياً للحصول على أفضل تداخل بين العوامل المدروسة وهذا يهدف للحصول على أكبر قيمة ممكنة للإستجابة المختارة، يوضح الرسم البياني كيفية تأثير العوامل على الإستجابة المثلى المتوقعة ( $Y$ ). بالإضافة إلى ذلك، تم تطبيق تقنية الدالة المرغوبة المركبة ( $D$ ) لتقييم تأثير العوامل المدروسة المتمثلة في كمية الخميرة  $m_L$ ، كمية أنوية التمر  $m_{nd}$ ، درجة الحموضة  $pH$  وزمن التخمير  $tf$ . وتظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن أقصى استجابة بلغت حوالي 0,39 عند كمية الخميرة ( $m_L=3\frac{g}{l}$ )، كمية أنوية التمر ( $m_{nd}=1,51\frac{g}{l}$ )، درجة الحموضة ( $pH=4,36$ ) و زمن التخمير ( $t_f=72$  h).

الجدول 9.V: قيم الإستجابة  $Y$  التي تم الحصول عليها في الشروط المثلى.

العوامل	الرمز	المستوى	القيمة المثلى	الدالة المرغوب فيها D
زمن التخمير	$t_f$	+1	72	d=1,00
درجة الحموضة	pH	-0,09	4,36	
كمية الخميرة	$m_L$	+1	3	
كمية الأنوية	$m_{nd}$	+0,01	1,51	
الإستجابة المثلى المتوقعة	$\frac{m_{Etha}}{m_{datte}}$	/	0,391856	



---

الخاتمة العامة

---

## الخلاصة العامة

في هذا العمل، تم إنتاج الوقود الحيوي (الإيثانول) من مخلفات التمور باستخدام عمليتي الاستخلاص والتخمير. وقد تم تحسين المعايير الرئيسية التي تؤثر على كلتا العمليتين، وهي نسبة كتلة التمر إلى حجم الماء، ودرجة حرارة، وزمن بالنسبة لعملية الاستخلاص؛ أما النسبة لعملية التخمير درسنا تأثير درجة حموضة الوسط، كمية أنوية التمر المضافة، كمية الخميرة، ومدة التخمير، وذلك باستخدام منهجية تصميم التجارب و بالاعتماد على نموذج بوكس بهنكن.

أظهرت النتائج المتحصل عليها أن أفضل الظروف لاستخلاص السكريات كانت عند نسبة كتلة التمر إلى حجم الماء 0.1955، درجة حرارة 43.03 درجة مئوية، وزمن استخلاص 34.74 دقيقة، مما أدى إلى مردود استخلاص مثالي قدره 0.056 ونسبة 13,77%. أما بالنسبة لعملية التخمير، فقد تم تحقيق أفضل مردودية للإيثانول عند كمية خميرة 3 غرام/لتر، وكمية أنوية التمر 1.51 غرام/لتر،

بينما بينت نتائج تجارب التخمير ان الظروف المثلى لعملية انتاج الايثانول تمت عند تطبيق الشروط التالية: كمية الخميرة: 3 غ/ل، زمن التخمير: 72 ساعة، pH الوسط: 4.3، وقد مكّنت هذه الشروط من تحقيق مردود قدره 0.391 غرام إيثانول لكل غرام من تمر الغرس، حيث اشار تحليل الانحدار لنموذج استخلاص السكر إلى وجود ارتباط جيد بين النتائج الملاحظة والمتوقعة، مما يؤكد صلاحية وجدوى هذا النموذج، مع قيم  $R^2$  عالية بلغت 98.90% وقيم  $R_{adj}^2$  بلغت 97,61%.

من بين اهم مخرجات هذه الدراسة توصلنا الى انه يمكن استخدام مخلفات تمور الغرس كمادة اولية لإنتاج الإيثانول الحيوي بمردود جد معتبر مما يؤهله ان يكون بديلاً واعداً ومستداماً لانتاج الطاقة الحيوية، وكذلك يسهم في التخفيف من التحديات البيئية والطاقوية. وقد أظهرت هذه الدراسة أن التحسين المنهجي لعمليات الاستخلاص والتخمير يمكن أن يعزز بشكل كبير كفاءة وفعالية إنتاج الإيثانول من هذه المادة الخام الوفيرة. نتمنى ان تؤخذ نتائج هذا العمل بعين الاعتبار وتكون نقطة انطلاق لأعمال بحثية اخرى يتم من خلالها تثمين هذه النتائج وتطبيقها على ارض كما يمكن ان نستغل هذه الدراسة لاسترجاع و تثمين انواع اخرى من المواد الحيوية مثل الشمنندر السكري، التين الشوكي، و الفواكه الفاسدة.