République Algérienne Démocratique et populaire

Ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université des Sciences et de la Technologie d'Oran

MOHAMED BOUDIAF

Ecole Doctorale en Génie Electrique
Département d'Electronique.

MEMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION DU MAGISTER
OPTION : Systèmes de communication modernes

Présenté par

TELIDJANE Mohammed

SUJET DU MEMOIRE

Optimisation du fonctionnement d'un système vert formé de PEMFC

Soutenue le 19/04/2011 **Devant le jury composé de**

N.MEKKAKIA Maaza	MC, Président	USTOMB
A.BOUDGHENE Stambouli	Professeur, Rapporteur	USTOMB
F.Z ZERHOUNI	MC,Co-Rapporteur	USTOMB
N.HAMDADOU	Professeur,Examinateur	ENSET Oran
M.TIOURSI	Professeur,Examinateur	USTOMB

Résumé

Les problèmes climatiques et la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre poussent les chercheurs à trouver des moyens de production d'énergie moins polluants selon le protocole de Kyoto. Un autre problème vient des réserves limitées en énergies fossiles. C'est précisément la raison pour laquelle la technique des piles à combustible est considérée comme porteuse d'un considérable potentiel d'avenir. C'est un composant nouveau , aujourd'hui candidat à la production d'électricité. Il constitue une offre de plus en plus riche permettant de couvrir de nouveaux besoins en électricité. L'utilisation de la pile à combustible est une technologie qui permet de convertir directement l'énergie chimique en énergie électrique. Elle est présentée comme étant un moyen écologique de production d'énergie puisque le seul déchet que la pile produit est l'eau. L'hydrogène est régulièrement cité comme source d'énergie du futur car il est très abondant sur la terre (dans sa forme atomique).Nous nous intéressons à la PEMFC (PAC à membrane échangeuse de protons). Un modèle de la pile à combustible (PAC) permet de satisfaire la prédiction du comportement de la pile en fonction de ses conditions de fonctionnement et de celles de la charge. Les générateurs (PAC), ont des performances qui sont fortement tributaires des conditions de fonctionnement liées à leur environnement. Ce travail constitue une contribution à l'étude des systèmes de conversion d'énergie avec composant électrochimique. Nous proposons une modélisation d'un système pile à combustible afin de décrire le comportement électrique de cet élément pour une généralisation future d'un système global. Nous étudions les performances selon certains facteurs. Le point de fonctionnement du système PAC-Charge est déterminé en prenant l'intersection de la caractéristique électrique courant-tension de la PAC avec celle de la charge. Ce point de fonctionnement varie du fait que la source d'énergie varie. C'est pourquoi, souvent, on n'obtient pas un rendement acceptable. Dû au coût élevé de la pile à combustible (PEMFC) et à la désadaptation parfois existante entre les caractéristiques de la PAC et de la charge, nous sommes intéressés par prédire la qualité d'adaptation obtenue du système. Différentes idées d'amélioration sont proposées dans notre travail. Une des méthodes est l'utilisation de sources multiples qui permettra d'atteindre une utilisation optimale selon le type d'application désirée. Une autre méthode présentée dans le présent travail est basée sur une recherche continue de la meilleure configuration du stack de PAC en changeant les différentes connexions des éléments PAC afin de minimiser les pertes engendrées dans un système PAC-charge couplé directement. De façons générale cette étude concerne l'optimisation de fonctionnement du système vert à base de PEMFC.

Mots clés : pile à combustible, température, pression ,oxygène, puissance, charge, rendement.

ملخص

إن قضايا المناخ والحاجة للحد من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري يؤدي إلى البحث عن سبل لإنتاج الطاقة النظيفة كما ينص بروتوكول كيوتو. وثمة مشكلة أخرى فيما يخص احتياطيات محدودة من الوقود الأحفوري. وهذا هو بالضبط السبب في تقنية بطاريات الوقود التي تحمل إمكانات كبيرة للمستقبل. هذا العنصر الجديد الآن مرشح لإنتاج الكهرباء. ومن عرضا الغنية على نحو متزايد لتغطية احتياجاتها من الكهرباء الجديدة. استخدام خلايا الوقود هي التكنولوجيا التي تحول الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية مباشرة. وهو مقدم على أنه إنتاج الطاقة الصديقة للبيئة والنفايات الوحيدة التي تنتج هي المياه البطارية. يشار بانتظام الهيدروجين كمصدر للطاقة في المستقبل لأنها وفيرة جدا على الارض (في صيغتها الذرية). ونحن مهتمون في خلايا الوقود بروتون تبادل. نموذج لخلية وقود يمكن الوفاء التنبؤ سلوك البطارية تبعا لظروف التشغيل ، وتلك من هذا العبء. مولدات خلايا الوقود ، والعروض التي تعتمد بشكل كبير على ظروف التشغيل المتصلة بيئتهم. وفي هذا السياق ، دراستنا تركز على وقود خلية. هذا العمل هو مساهمة في دراسة نظم تحويل الطاقة مع عنصر الكهروكيميائية. ونقترح نموذجا للنظام خلية وقود لوصف السلوك الكهربائي لهذا العنصر لتعميم النظام العام_ في المستقبل. ندرس الأداء تبعا لعوامل معينة. يتم تحديد نقطة التشغيل من تحميل خلايا الوقود عن طريق اتخاذ تقاطع مميزة التيار الكهربائي و التوتر لخلايا الوقود مع مميزة الشحنة. هذه النقطة تختلف مع اختلاف مصدر الطاقة. لذلك أحيانا لا نحصل على أداء مقبول. نظرا لارتفاع تكلفة خلايا الوقود، وعدم التطابق الموجود أحيانا بين خلايا الوقود و الشحنة ، نحن مهتمون في توقع نوعية التناسب تم الحصول عليها من النظام. ونقترح أفكارا مختلفة لتحسين عملنا. أسلوب واحد هو استخدام مصادر متعددة من شأنها تحقيق الاستخدام الأمثل حسب نوع التطبيق المطلوب. ويستند أسلوب آخر قدم في هذا العمل على البحث المستمر عن طريق تغيير اتصالات وحدات خلايا الوقود لتقليل الخسائر الناجمة عن نظام خلايا الوقود-شحنة مرتبطين مباشرة.
هذه الدراسة تهتم لتشغيل أمثل لنظام أخضر متكون من خلايا الوقود.

كلمات البحث : خلايا الوقود - درجة الحرارة - ضغط الأكسجين - الشحنة - الاستطاعة والأداء.

Remerciements

Je remercie sincèrement mon encadreur Monsieur A.BOUDGHENE STAMBOULI Professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran MOHAMED BOUDIAF. et le co-encadreur F.Z ZERHOUNI Maître de Conférences à l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran MOHAMED BOUDIAF, qui m'ont suivi tout au long de ce mémoire et qui m'ont apporté tous le savoir faire nécessaire au bon déroulement de mes travaux de recherche.

Je remercie les membres du jury de soutenance de mon mémoire.

Je remercie Monsieur A.BELGHOREF, notre chef d'option Professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran MOHAMED BOUDIAF.

Enfin, j'adresse mes remerciements à ma famille, tous mes amis et à tous mes collègues de l'institut d'électronique de l'université des sciences et de la technologie d'Oran MOHAMED BOUDIAF.

Sommaire

Introduction générale **01**

ChapitreI - Généralités sur les piles à combustible

1. Introduction **02**
2. Principe d'une pile à combustible **02**
3.Les principaux composants d'une pile à combustible **02**
4. Types de piles à combustible **03**
4.1 Pile à combustible à membrane échangeuse de proton, PEMFC **04**
4.1.1 Type d'électrolyte **04**
4.1.2 Température de fonctionnement **04**
4.1.3 Avantages et inconvénients de la PEMFC **05**
5. Constitution d'une PEMFC **05**
5.1 Membranes polymères ioniques **05**
5.2 Les électrodes **05**
5.3 Les plaques bipolaires **06**
6. Pile à combustible et batterie **06**
7. Les avancées dans le domaine des piles **06**
8. Applications des piles à combustible **07**
9. Inconvénients **07**
10. L'hydrogène **07**
11. Thermodynamique de la pile à combustible **09**
11.1 Energie et tension à vide **09**
11.2 Rendements **11**
11.2.1 Rendement en matière **12**
11.2.2 Rendement en tension **12**
11.2.3 Rendement énergétique **13**
11.2.4 Cumul des rendements **13**
12.Consommation et production des gaz **13**
12.1 Production d'eau **13**
12.2 Production de chaleur **14**
13. Conclusion **15**

Chapitre II-Modélisation d'une Pile à Combustible PEMFC

1. Introduction **17**
2.Caractéristiques courant tension de la pile à combustible (PEMFC) **17**
3. Modélisation de la pile PEM **18**
3.1 Modèle de Kim **18**
3.2 Modèle interne (N. Albrieux) **19**
3.3 Modèle d'Amphlett **20**
3.3.1 Caractéristiques de polarisation d'une pile à combustible PEMFC **21**
3.3.1.1 Aux faibles densités de courant **22**
3.3.1.2 Aux densités de courant moyennes **23**
3.3.1.3 Aux densités de courant élevées **24**

3.3.1.4 Potentiel réel global 24
4. Application du modèle aux piles SR12, BCS500W, BallardV 26
4.1. Courbe de polarisation 27
4.2. Courbe d'efficacité 29
4.3.Courbe de rendement 31
4.4.Courbe de puissance 33
5.Effet des paramètres sur la pile Avista SR-12 34
5.1. Effet de la température 34
5.2 Effet de la pression 35
5. 3 Effet du paramètre A 36
5.4 Effet du parametre L 37
5.5 Effet du parametre Rc 38
5.6 Effet du paramètre B 38
5.7 Effet du paramètre imax 39
5.8 Effet du paramètre ξ1 40
5.9 Effet du paramètre ξ3 40
5.10 Effet du paramètre ξ4 41
6. Comparaison entre la puissance d'un stack de la pile Avista SR12 avec BCS500W 42
7 . Simulation de consommation d'hydrogène d'une pile à combustible 42
8. Simulation de consommation d'oxygène d'une pile à combustible 43
9. Simulation de l'entropie de l'eau, d'hydrogène, d'oxygène 44
10. Simulation de la tension de Nernst en fonction de la température 44
11. Simulation des Pertes d'activation en fonction de la température 45
12. Simulation des pertes d'activation en fonction de la densité de courant 45
13 .Simulation des pertes ohmiques en fonction de la densité de courant 46
14. Simulation des pertes ohmiques en fonction de la section de la pile 47
15. Conclusion 47

Chapitre III-Couplage direct Pile à combustible -Charge

1.Introduction 50
2.Principe 50
3. Etude d'un exemple 51
4. Etude d'un autre exemple 60
5. Conclusion 68

Chapitre IV-Etude de source commune et sources séparées

1.Introduction 70
2.Principe 70
3. Etude d'un exemple 71
3.1 Couplage direct sources séparées-charge 71
3.2 Couplage direct source commune-charge 85
4.Conclusion 92

Chapitre V-Connexion stack - charge par commutation

1. Introduction 95
2 .Principe de la méthode 95
3. Etude d'un exemple 96

4. Généralisation de notre méthode **97**
5. Conclusion **105**

VI. Conclusion générale **107**

Liste des figures

FigureI.1 : Principe élémentaire d'une pile

Figure I.2: Réactions produites

Figure II.1 : Courbe de polarisation théorique

Figure II.2 : Hypothèses du modèle électrique des composants électrochimiques.

Figure II.3 : Schéma électrique dynamique équivalent d'une pile .

Figure II.4 : Courbe de polarisation de la pile Avista SR-12

Figure II.5 : Courbe de polarisation de la pile BCS 500W

Figure II.6 : Courbe de polarisation de la pile Ballard V

Figure II.7 : Courbe d'efficacité de la pile SR-12

Figure II.8 : Courbe d'efficacité de la pile BCS 500W

Figure II.9 : Courbe d'efficacité de la pile Ballard V

Figure II.10 : Courbe de rendement de la pile Avista SR-12

Figure II.11 : Courbe de rendement de la pile BCS 500W

Figure II.12 : Courbe de rendement de la pile Ballard V

Figure II.13 : Courbe de puissance de la pile Avista SR-12

Figure II.14 : Courbe de puissance de la pile BCS 500W

Figure II.15 : Courbe de puissance de la pile Ballard V

Figure II.16 : Effet de la température sur la réponse de la pile

Figure II.17 : Effet de la pression sur la réponse de la pile

Figure II.18 : Effet du paramètre A sur la réponse de la pile

Figure II.19 : Effet du paramètre L sur la réponse de la pile

Figure II.20 : Effet du paramètre Rc sur la réponse de la pile

Figure II.21 : Effet du paramètre B sur la réponse de la pile

Figure II.22 : Effet du paramètre imax sur la réponse de la pile

Figure II.23 : Effet du paramètre $\xi 1$ sur la réponse de la pile

Figure II.24 : Effet du paramètre $\xi 3$ sur la réponse de la pile

Figure II.25 : Effet du paramètre $\xi 4$ sur la réponse de la pile

Figure II.26 : Comparaison entre la puissance d'un stack de la pile avec la pile SR-12 et BCS 500W

Figure II.27 : Consommation d' hydrogène d'une pile à combustible

Figure II.28 : Consommation d'oxygène d'une pile à combustible

Figure II.29 : Entropies d'hydrogène et de l'oxygène en fonction de la température.

Figure II.30 : Tension de Nernst en fonction de la température

Figure II.31 : Pertes d'activation en fonction de la température

Figure II.32 : Pertes d'activation en fonction de la densité de courant

Figure II.33 : Pertes ohmiques en fonction de la densité de courant

Figure II.34 : Pertes ohmiques en fonction de la section de la pile

Figure III.1 : Connexion directe PAC-charge.

Figure III.2 : Caractéristique tension-densité de courant pour différentes températures pour la charge R.

Figure III.3 : Représentation des densités de puissance en fonction de la densité de courant pour la charge1 pour différentes températures.

Figure III.4 : Différentes densités de puissance obtenues pour la charge R en fonction de la température.

Figure III.5 : Variation du rendement selon la température pour la charge R pour P_{o2}=1atm.

Figure III.6.a : Variations V-J pour diverses pressions à T=40°C pour la charge R et le stack.

Figure III.6.b : Variations V-J pour diverses pressions à T=40°C pour la charge R et le stack zoomée.

Figure III.7.a : Variations P-J des densités de puissance pour diverses pressions à T=40°C pour la chargeR et le stack.

Figure III.7.b : Variations P-J des densités de puissance pour diverses pressions à T=40°C pour la charge R et le stack zoomée.

Figure III.8: différentes densités puissances obtenues pour la charge R et le stack en fonction de la pression.

Figure III.9 : Variation du rendement selon la pression pour la charge R.

Figure III.10 : Caractéristique tension-densité de courant pour différentes températures pour la chargeR' et le stack.

Figure III.11 : Caractéristiques des densités de puissance en fonction de la densité de courant pour la chargeR' et le stack pour différentes températures à P_{o2}=1atm.

Figure III.12 : Différentes densités de puissance obtenues pour la charge R' et le stack en fonction de la température.

Figure III.13 : Variation du rendement selon la température pour la charge R'.

Figure III.14.a : Variations des caractéristiques V-J pour P_{o2} variable à T=40°C pour la charge R' et le stack.

Figure III.14.b : Variations des caractéristiques V-J pour P_{o2} variable à T=40°C pour la charge R' et le stack zoomée.

Figure III.15.a : Variations des caractéristiques P-J pour P_{o2} variable à T=40°C pour la charge R' et le stack.

Figure III.15.b : Variations des caractéristiques P-J pour P_{o2} variable à T=40°C pour la charge R' et le stack zoomée.

Figure III.16: Différentes densités de puissance obtenues pour la charge R' en fonction de la pression pour T=40°C.

Figure III.17: Variation du rendement selon la pression pour la charge R'.

Figure IV.1 : Couplage direct source separèe-charge

Figure IV.2 : Couplage direct source commune-charge

Figure IV.3: Caractéristique tension-densité de courant pour différentes températures pour la charge1.

Figure IV.4 : Caractéristique tension-densité de courant pour différentes températures pour la charge2.

Figure IV.5 : Représentation P-J pour la charge1 pour différentes températures.

Figure IV.6 : Représentation P-J pour la charge2 pour différentes températures.

Figure IV.7 : Différentes densités de puissance obtenues pour la charge1 en fonction de la température.

Figure IV.8 : Différentes densités de puissance obtenues pour la charge2 en fonction de la température.

Figure IV.9 : Variation du rendement selon la température pour la charge1.

Figure IV.10: Variation du rendement selon la température pour la charge2.

Figure IV.11.a: Caractéristiques V-J obtenues pour différentes pressions de la charge1

Figure IV.11.b : Caractéristiques V-J obtenues pour différentes pressions de la charge1 en zoome**.**

Figure IV.12.a: Caractéristiques V-J obtenues pour différentes pressions de la charge2en zoom .

Figure IV.12.b: Caractéristiques V-J obtenues pour différentes pressions de la charge2en zoom**.**

Figure IV.13.a : Représentation des densités de puissance pour différentes densités de courant pour la charge1.

Figure IV.13.b : Représentation zoomée des densités de puissance pour différentes densités de courant pour la charge1.

Figure IV.14.a : Représentation des densités de puissance pour différentes densités de courant pour la charge2 .

Figure IV.14.b : Représentation des densités de puissance pour différentes densités de courant pour la charge2 zoomée.

Figure IV.15 : Différentes densités de puissance obtenues pour la charge1 en fonction de la pression.

Figure IV.16: Différentes densités de puissance obtenues pour la charge2 en fonction de la pression.

Figure IV.17: Variation du rendement selon la pression pour la charge1.

Figure IV.18 : Variation du rendement selon la pression pour la charge2.

Figure IV.19 : Caractéristiques V-J pour différentes températures pour la charge équivalent.

Figure IV.20: Représentation des densités de puissance en fonction de densité de courant pour la charge équivalente pour différentes températures.

Figure IV.21: Différentes densités de puissance obtenues pour toutes les charges en fonction de la température.

Figure IV.22: Variation du rendement selon la température pour toutes les charges

Figure IV.23.a: Caractéristique tension-densité de courant pour différentes pressions pour la charge équivalente.

Figure IV.23.b: Caractéristique tension-densité de courant pour différentes pressions pour la charge équivalente zoomée.

Figure IV.24.a: Représentation des densités de puissance pour différentes densités de courant pour la charge équivalente.

Figure IV.24.b: Représentation des densités de puissance pour différentes densités de courant pour la charge équivalente zoomée.

Figure IV.25: Différentes densités de puissance obtenues pour toutes les charges en fonction de la pression.

Figure IV.26: Variation du rendement selon la pression pour toutes les charges.

Figure V.1 : Divers caractéristiques électriques V-J de la tension pour les deux configurations.

Figure V.2 : Variation de la tension pour toutes les configurations possibles P_{o2}=1atm et T=40°C.

Figure V.3.a : Différentes caractéristiques pour les configurations prises pour différentes températures.

Figure V.3.b : Différentes caractéristiques pour les configurations prises pour différentes températures en zoom.

Figure V.4 : Variation de la densité de courant de commutation pour différentes températures.

Figure V.5 : Variation de la tension de commutation pour différentes températures.

Figure V.6 : Variation de la tension de commutation en fonction de densité de courant de commutation pour différentes températures.

Figure V.7 : Variation de la densité de puissance de commutation pour différentes températures.

Figure V.8.a: Variation de la tension pour les deux configurations pour différentes pressions.

Figure V.8.b : Variation de la tension pour les deux configurations pour différentes pressions en zoom.

Figure V.9 : Variation de la tension de commutation en fonction de densité de courant de commutation pour différentes pressions.

Figure V.10: Variation de la densité de courant de commutation pour différentes pressions.

Figure V.11 : Variation de la tension de commutation pour différentes pressions.

Figure V.12 : Variation de la densité de puissance de commutation pour différentes pressions.

Liste des tableaux

Tableau I.1 : caractéristiques de toutes les piles à combustible.
Tableau I.2: Propriétés de l'hydrogène.
Tableau I. 3 : Pertes de puissance dans une pile à combustible .
Tableau II.1 :Paramètres d’une cellule de la pile Ballard V .
Tableau II.2 : Paramètres d’une cellule de la pile Avista SR-12.
Tableau II.3 : Paramètres d’une cellule de la pile BCS 500 W.

Introduction générale

De nos jours, l'intérêt pour les énergies renouvelables ne cesse de se développer. Plusieurs facteurs rentrent en jeu comme le réchauffement climatique, la hausse des prix de l'énergie.

Le réchauffement climatique est un constat étayé par des rapports scientifiques. Les causes du réchauffement sont attribuées à l'activité humaine et essentiellement aux émissions de gaz à effet de serre. Selon le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC),l'activité humaine serait impliquée pour plus de 90% dans le réchauffement. Les objectifs du protocole de Kyoto (1997), sont de développer des énergies renouvelables pour la production d'électricité et de limiter les gaz à effets de serre (diminuer de 5,2% les émissions en 2010 par rapport à celles de 1990).

L'enjeu énergétique est double : trouver une source d'énergie capable de remplacer le pétrole et ne dégageant pas ou peu de gaz à effet de serre. C'est dans ce contexte que se développent les énergies renouvelables. Il est important de noter que pour répondre à nos besoins croissants en énergie de la façon la plus durable possible, il est nécessaire de développer toutes les énergies renouvelables et ce malgré leurs coûts élevés, leur répartition géographique non uniforme sur le globe et le caractère aléatoire de leur production d'énergie.

Ce travail concerne l'optimisation de fonctionnement du système vert à base de PEMFC. Dans le premier chapitre introductif, nous donnons une synthèse sur le principe de fonctionnement des piles à combustibles, leurs caractéristiques, leurs constituants, leurs domaines d'application et les avantages qui font de cette technique une meilleure remplaçante des énergies fossiles. Dans le deuxième chapitre, nous décrivons les caractéristiques électriques de la pile à combustible à membrane échangeuse de proton et sa modélisation statique par le modèle d'Amphlett. Ce modèle, semi-empirique, prend en compte la plupart des paramètres influant les performances de la pile. Le modèle a été appliqué pour trois types de pile BALLARD V , AVISTA SR12 et BSC500W.

Ensuite, nous étudions le couplage direct PAC-charge dans le troisième chapitre afin de prédire la qualité d'adaptation du système. En quatrième chapitre, nous proposons une méthode d'amélioration du fonctionnement du système global une de ces méthodes est l'utilisation des sources multiples qui permettra d'atteindre une utilisation optimale selon le type d'application désirée. En dernier lieu, une autre méthode est présentée baser sur la recherche continue de la meilleure configuration du stack de PAC en changeant les différentes connexions des modules.

Nous terminons ce travail par une conclusion générale ainsi que les perspectives prévues pour cette technologie dans le domaine de recherche et développement (RD), et l'industrie.

Chapitre I

Généralités sur les piles à combustible

1. Introduction

Parmi les technologies envisagées pour l'avenir en terme de production d'énergie électrique décentralisée, la pile à combustible est considérée comme une solution très prometteuse [1].Sir William Grove est souvent considéré comme l'inventeur de la pile à combustible en 1839 [2].

Ce convertisseur d'énergie, à la fois propre et efficace, permet de convertir l'énergie chimique de l'hydrogène, vecteur énergétique qui présente une énergie 3 fois plus importante que l'essence, en une énergie électrique utilisable directement et une énergie thermique qu'il est possible de valoriser [1].

2. Principe d'une pile à combustible

Une pile à combustible permet de convertir directement de l'énergie chimique en énergie électrique. Par ailleurs, le combustible est fourni en continu à la différence des piles traditionnelles. On peut ainsi obtenir du courant de façon continue. Pour utiliser des combustibles type méthanol ou autres alcools, il faut des températures de fonctionnement bien plus élevées: 800 à 1000°C. La réalisation de piles fonctionnant à de telles températures est problématique: on préfère donc utiliser de l'hydrogène[3].

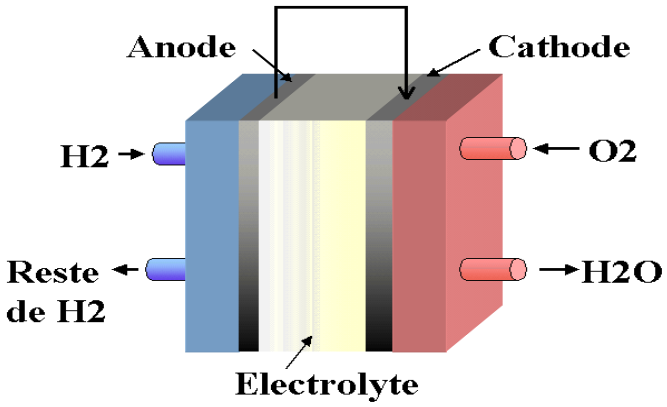


Figure I.1 : Principe élémentaire d'une pile

La figure(I.1) montre le principe élémentaire d'une pile à combustible.

3.Les principaux composants d'un PAC

Une pile à combustible est constituée des trois principaux éléments [3].

- l'anode qui est alimentée par un combustible (hydrogène, méthanol, etc.) ;
- la cathode qui est alimentée par un comburant (oxygène) ;
- l'électrolyte, solide ou liquide, qui sépare les deux électrodes, assure la diffusion des ions intermédiaires de la réaction d'oxydation du combustible.

L’électrolyte doit empêcher le passage des électrons qui passent à travers le circuit électrique.

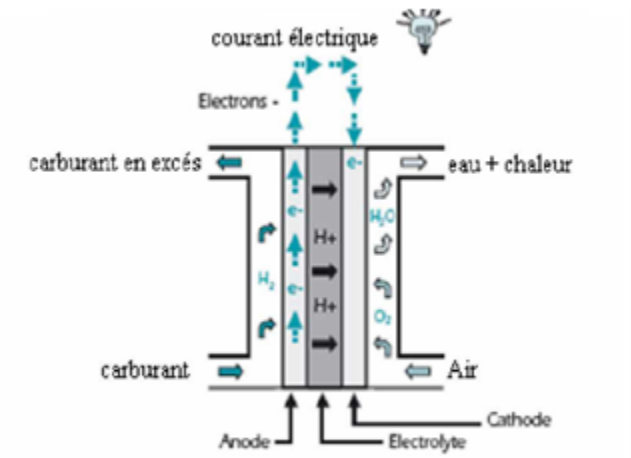


Figure I.2: Réactions produites

Les deux électrodes sont séparées par l'électrolyte. A l'anode, on amène le combustible (le plus souvent de l'hydrogène, parfois du méthanol). La cathode est alimentée en oxygène (ou plus simplement en air, enrichi ou non en oxygène) comme le montre la figure (I.2)

. 4. Types de piles à combustible

La classification des piles à combustible se fait généralement selon la nature de l'électrolyte, la température à laquelle la pile fonctionne et, d'autre part, le type d'ions assurant la conduction ionique. On trouve ainsi :

- la pile à membrane échangeuse de proton (PEMFC , *Polymer electrolyte fuel cell) (80°C)*
- la pile à combustible alcaline (AFC, *Alkaline fuel cell)* (100°C)
- la pile à acide phosphorique (PAFC, *Phosphoric acid fuel cell)* (200°C)
- la pile à carbonates fondus (MCFC, *Molten carbonate fuel cell)* (700 °C)
- la pile à électrolyte solide (SOFC, *Solid oxyde fuel cell)* (800°C-1000°C)

Le tableau suivant regroupe les différents types de pile à combustible[3].

Type de pile	Ion mobile	Température (°C)	Temps de démarrage	Applications
Alcaline(AFC)	OH^-	50-200	<0.1 h	Vaisseaux spatiaux (Apollo,p.ex.)
Membrane échangeuse de protons (PEMFC)	H^+	50-100	<0.1 h	Véhicules, applications mobiles, cogénération
Acide phosphorique (PAFC)	H^+	220	1- 4 h	Cogénération
Carbonate Fondu (MCFC)	$CO^{2/3-}$	700	5-10 h	Cogénération
Oxyde solide (SOFC)	O^{2-}	800-1000		Cogénération, Auxiliaire des Véhicules
Méthanol direct (DMFC)	H^+	50-130	<0.1 h	Applications Mobiles, transport

Tableau I.1 : caractéristiques de toutes les piles à combustible.

Pour notre part, nous avons travaillé avec la PEMFC qui est présentée ci dessous.

4.1 Pile à combustible à membrane échangeuse de proton, PEMFC

4.1.1 Type d'électrolyte

L'électrolyte de la pile PEMFC pile à combustible à membrane échangeuse de proton est généralement une membrane polymère perfluorée capable de transporter les ions hydrogène H^+ .

Les demi-équations électrochimiques ayant lieu à l'anode et à la cathode sont les suivantes :

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^- \quad (\text{anode}) \qquad (I.1)$$

$$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O \quad (\text{cathode}) \qquad (I.2)$$

4.1.2 Température de fonctionnement

Ces piles travaillent à une température inférieure à 100 °C. La faible température de fonctionnement leur confère une aptitude à démarrer relativement rapidement.

4.1.3 Avantages et inconvénients de la PEMFC

Ces piles cumulent certains avantages :

- l'électrolyte est solide. Il n'y a donc pas de risque de fuite de l'électrolyte.
- la température de fonctionnement est faible et le démarrage est donc rapide .
- la puissance massique est élevée, la densité de puissance peut atteindre 1kW/kg.

Elles présentent cependant certains inconvénients .On citera à titre d'exemple

- les membranes doivent être impérativement maintenues en permanence dans un bon état d'hydratation pour favoriser le transport des protons. Dans le cas contraire, il y a un risque de détérioration de la membrane.
- Elles sont sensibles au monoxyde de carbone (CO) qui empoisonne les sites catalytiques.

5. Constitution d'une PEMFC

Une pile à combustible est constituée d'un empilement de cellules qui forment un stack. Ces cellules élémentaires sont constituées de l'ensemble électrode-membrane-électrode (EME).

5.1 Membranes polymères ioniques

Les membranes conductrices protoniques constituent le cœur des piles à combustible de type PEMFC. Ce sont leurs propriétés de conduction qui vont conditionner la recombinaison électrochimique de l'hydrogène avec l'oxygène, et donc ses performances. Les chutes ohmiques limitent le fonctionnement à hautes densités de courant et sont principalement associées aux membranes (la résistance de la membrane étant liée au rapport épaisseur sur conductivité protonique). De plus, ces dernières doivent présenter de bonnes propriétés de résistance mécanique et chimique dans les conditions de fonctionnement, ne pas être perméables aux gaz et maintenir une teneur en eau élevée à haute température car cela conditionne les propriétés de conduction.

Cette membrane est ensuite associée à deux électrodes une sur chaque face pour permettre l'alimentation en gaz et favoriser la réaction chimique [4].

5.2 Les électrodes

Les électrodes sont le lieu des réactions d'oxydoréduction. Les électrodes doivent présenter les caractéristiques suivantes :

- Etre poreuses pour permettre la diffusion des gaz jusqu'aux sites de réaction. Elles sont généralement en feutre de carbone ou en papier carbone.

- Etre imprégnées d’une pate constituée de catalyseur contenant du carbone platine sur la face en contact avec l’électrolyte.
- Etre de bonnes conductrices électroniques (collecte d’électrons et conduction vers les plaques bipolaires).
- Etre flexibles pour augmenter la surface de contact avec l’électrolyte. A l’heure actuelle, le catalyseur utilisé est du platine.

La partie de l´électrode imprégnée de pate constitue la zone active. La partie non imprégnée constitue la zone difusionnelle.

5.3 Les plaques bipolaires

Les plaques bipolaires ont pour fonction la collecte du courant, la distribution et la séparation des gaz à l’anode et à la cathode. Les matériaux des plaques bipolaires doivent donc posséder un niveau de conductivité électrique suffisant, une imperméabilité au gaz supérieure à la membrane échangeuse de protons. Les plaques les plus courantes sont réalisées en graphite.

6. Pile à combustible et batterie

Une pile à combustible, tout comme une batterie, est constituée de deux électrodes et d’un électrolyte. Il existe cependant des différences notables par rapport aux batteries. La batterie est un dispositif de stockage d’énergie. L’énergie maximum utilisable est déterminée par la quantité de réactant chimique stocké dans la batterie elle-même. La batterie cesse donc de produire de l’électricité lorsque tout le réactant chimique est consommé. Dans une pile à combustible par contre, les électrodes ne sont pas consommées avec le temps et les produits ne sont pas stockés à l’intérieur de la pile. Ainsi, tant que le combustible et le comburant sont fournis à la pile, l’électricité continue de circuler [5].

Nous avons passé en revue les constituants de la PEMFC .Nous allons aborder à présent, de façon générale les points forts de la PAC.

7. Les avancées dans le domaine des piles

C'est réellement au début des années 1990 que les piles connaissent un regain d'intérêt. Cela est dû à plusieurs facteurs déterminants [2].

- L'aggravation des problèmes environnementaux liés à l'effet de serre relancent la recherche dans les piles à combustible,
- Les progrès technologiques
- Les premiers prototypes (véhicules, installations stationnaires) sont développés.

Les piles présentent un avantage en termes de pollution: si on utilise de l'hydrogène pur, les rejets sont pratiquement nuls et en principe plus faibles que dans les technologies concurrentes si l'hydrogène est produit par reformage. De plus, les nuisances sonores sont très faibles, ce qui facilite l'insertion urbaine.

8. Applications des piles à combustibles

Les PAC peuvent en principe être utilisées dans tous les secteurs industriels concernés par la production d'énergie électrique. Ces utilisations peuvent être regroupées en trois classes [3] :

- Utilisation portable telle que le téléphone, ordinateur. . etc.
- Utilisation stationnaire dans la génération de la chaleur et de l'électricité.
- Utilisation dans le transport (voiture, bus et véhicules de transport).

9. Inconvénients

Les inconvénients associés aux piles à combustible sont liés à leur manque de développement :

- le poids et le volume ;
- coût trop élevé de production et de maintenance ;
- durée de vie trop faible ;
- gestion thermique délicate ;
- disponibilité insuffisante de l'hydrogène.
- Le plus gros problème actuellement reste le prix [6].

La plupart des piles à combustible ne sont encore que des prototypes et leur durée de vie reste insuffisante. Plusieurs systèmes PEMFC de Plug Power ayant une puissance électrique de 5 kW ont fonctionné environ 12 000 h et des petites installations AFC d'Orbiter Fuel Cell ont fonctionné 15 000 h. Dans le cas de certaines applications, il faut évacuer la chaleur générée par la pile. Cela impose donc un système de refroidissement. Utiliser de l'hydrogène à grande échelle suppose que l'on ait réglé les problèmes liés à son stockage et à sa distribution. Tout autre combustible que l'hydrogène impose l'utilisation d'un reformeur, une contrainte importante en espace, en poids.

10. L'hydrogène

Les différentes techniques de stockage de l'hydrogène couplé à une pile à combustible permettent la production d'énergie électrique. Toutefois, l'hydrogène n'existant pas naturellement, il ne constitue pas une source d'énergie et devra être produit à partir d'autres sources énergétiques, telles que le solaire. Sa production pourrait être par électrolyse.

Le carburant utilisé en pile, généralement de l'hydrogène, peut être directement aussi produit sur place par reformage à partir d'hydrocarbures par exemple. Les sources d'hydrogène peuvent être multiples. Il sera évidemment nécessaire de transporter et stocker cet hydrogène.

Les deux vecteurs majeurs électricité et hydrogène ont la remarquable propriété d'être complètement interchangeables grâce aux deux technologies de la pile à combustible et de l'électrolyseur. Grâce à cette configuration réversible, l'énergie pourra indifféremment être apportée ou soutirée sous l'une quelconque des deux formes, électricité et hydrogène.

Les avantages de l'hydrogène sont nombreux :

- c'est un atome abondant sur terre (sous forme d'eau),
- c'est la molécule la plus énergétique : 120 MJ/kg, soit 2,2 fois le gaz naturel,
- il n'est ni polluant, ni toxique,
- sa combustion dans l'air ne génère que de l'eau,
- c'est le plus léger des gaz ce qui est un facteur positif vis à vis de la sécurité (grande vitesse de diffusion dans l'air),
- son transport est aisé
- ses modes de production sont variés et il est le combustible idéal des piles à Combustible

Il convient aussi de résumer ses inconvénients. L'hydrogène est le plus inflammable et le plus explosif des gaz et à cause du faible rayon de sa molécule, il fuit ou diffuse très facilement. C'est aussi le plus volatil, ce qui représente un avantage du point de vue de la sécurité car il se dissipe rapidement (il est 14 fois plus léger que l'air). Un des dangers associés à la flamme de l'hydrogène est qu'elle est très chaude (de l'ordre de 3000°C) et invisible [7.8]. Le tableau ci-dessous résume les données techniques de l'hydrogène[9].

Masse atomique	1,0079 g/mol
Température de solidification	14 K
Température d'ébullition	20,3 K
Densité liquide à (20,3 K)	70.79 kg/m^3
Densité gazeuse à (20,3 K)	1.34 kg/Nm^3
Densité gazeuse à (273 K)	0.08988 kg/Nm^3
PCI (Pouvoir calorifique inférieur)	120 MJ/kg
PCS (Pouvoir calorifique supérieur)	142 MJ/kg
Energie d'évaporation	445 kJ/kg
Energie de liquéfaction	14112 kJ/kg
Cp (20°C)	14,3 kJ/kg K
Cv (20°C)	10,3 kJ/kg K
Température d'auto inflammation dans l'air	858 K
Température de flamme dans l'air	2318 K
Limites d'inflammabilité dans l'air	4-75 (%vol)
Limites de détonabilité dans l'air	13-65 (%vol)
Energie d'inflammation	0,020 mJ

Tableau I.2: Propriétés de l'hydrogène.

11.Thermodynamique de la pile à combustible

11.1 Energie et tension à vide

Dans le cas de la pile à combustible, l'énergie apportée est l'énergie chimique contenue dans les gaz entrant dans la pile. L'énergie fournie par la pile est l'énergie électrique et l'énergie thermique. Pour l'énergie thermique, on utilise le flux de chaleur, et pour l'électricité, le produit du courant par la tension permet de calculer la puissance électrique [10].

Pour l'énergie chimique, on utilise l'énergie libre de Gibbs. Elle représente l'énergie disponible pour un travail externe en négligeant celui effectué par des changements en pression ou volume.

Ces derniers n'interviennent pas dans la conversion d'énergie dans la pile à combustible, car la réaction a lieu à pression et température constantes.

Une autre grandeur importante est l'enthalpie qui inclut l'énergie libre de Gibbs et l'énergie due à la création d'entropie.

L'énergie libre de Gibbs a les propriétés suivantes :

- Le point zéro peut être défini n'importe où. Normalement, il est défini pour des éléments dans leur état normal à température et pression normales. Pour une pile

travaillant dans ces conditions, les gaz entrant ne portent donc pas d'énergie libre de Gibbs.

- Ce qui compte pour les calculs d'énergie est uniquement la différence d'énergie libre de Gibbs entre les produits réactants. Cette différence est notée ΔG.
- L'énergie libre de Gibbs est reliée à l'enthalpie H par le terme de création d'entropie TS. Ce dernier traduit la deuxième loi de la thermodynamique :

$$G = H - T\,S \qquad \text{(I.3)}$$

Avec

H : l'enthalpie.
G : l'énergie libre de Gibbs.
T : température d'une cellule.
S : l'entropie.

On considère H et S constants. G est fonction de la température T. L'énergie libre de Gibbs est souvent ramenée à une mole et prend donc l'unité J mol^{-1}.

L'équation (I.4) exprime la réaction dans la pile pour une mole d'hydrogène consommée [10]:

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O \qquad \text{(I.4)}$$

La variation de l'énergie libre de Gibbs est donc

$$\Delta G = GH_2O - GH_2 - {}^1\!/_2\,GH_2 \quad [Jmol^{-1}] \qquad \text{(I.5)}$$

Pour établir une relation entre l'énergie libre de Gibbs et l'énergie électrique, il suffit de connaître le débit molaire d'hydrogène nécessaire pour un courant donné. Deux électrons sont échangés par chaque molécule d'hydrogène. Une mole consiste en NA électrons (avec NA =6.022 10^{23} le nombre d'Avogadro). Et puis, un électron porte la charge élémentaire q=-1.602 10^{-19} C. La charge échangée par mole d'hydrogène est donc -2qNA=-2F où F = 96485 C mol^{-1} est la constante de Faraday.

Le courant est le produit de la charge par mole par le débit molaire :

$$I = -2F\,d \qquad \text{(I.6)}$$

Le travail électrique finalement est le produit de la charge électrique par la tension V. Dans le cas d'une réaction réversible, il doit être égal au travail chimique représenté par

l’énergie libre de Gibbs :

$$-2F\,V = \Delta G \qquad \text{(I.7)}$$

D'où

$$V = -\Delta G \;\; 2F \qquad \text{(I.8)}$$

On peut également raisonner par rapport à la puissance. La puissance électrique doit être égale à la puissance chimique qui s'écrit comme le produit de l'énergie libre de Gibbs par le débit molaire d :

$$IV = \Delta G d \qquad \text{(I.9)}$$

Dans des conditions normales, la tension thermodynamique d'une pile à hydrogène est V = 1.23 V. Ceci est la tension d'une pile idéale qui ne comporte pas d'irréversibilités [10].

11.2 Rendements

Le rendement d'un processus de transformation d'énergie est défini comme suit :

$$\eta = \frac{énergie\ réupérée}{énergie\ fournie} \qquad \text{(I.10)}$$

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O_{vap} \qquad \text{(I.11)}$$

$$\Delta H = -241.83 \quad [kJ\ mol^{-1}] \qquad \text{(I.12)}$$

Si l'eau est condensée après la combustion, la valeur de l'enthalpie change :

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O_{liq} \qquad \text{(I.13)}$$

$$\Delta H = -285.84 \quad [kJ\ mol^{-1}] \qquad \text{(I.14)}$$

La différence entre les deux valeurs correspond à l'enthalpie d'évaporation de l'eau, ou chaleur latente.

Pour la distinction, les valeurs de ΔH ont des noms spécifiques. La première est appelée pouvoir calorifique inférieur (PCI), et la deuxième pouvoir calorifique supérieur

(PCS). Il est toujours nécessaire de spécifier quelle valeur est utilisée pour indiquer un rendement.

11.2.1 Rendement en matière

Il n'est pas possible de fournir à une pile à combustible exactement la quantité de gaz qui serait nécessaire à la réaction. Pour des raisons de distribution à l'intérieur de la pile et des impuretés des gaz, un certain excès est toujours nécessaire. Pour le bilan d'énergie, cette quantité de gaz est perdue. On définit donc le rendement en matière :

$$\eta_{mat} = \frac{débit\ consommé}{débit\ fourni} \qquad \text{(I.15)}$$

Un défi du développement des piles à combustible est la minimisation de l'excès d'hydrogène. Ceci est possible en optimisant la structure des canaux. Néanmoins, l'hydrogène en excès n'est pas forcément perdu pour le système. Une pompe de recirculation peut en injecter une partie de nouveau dans le stack.

11.2.2 Rendement en tension

Pour différentes raisons, l'énergie délivrée par la pile à combustible ne correspond pas à l'énergie libre de Gibbs, et la tension théorique de 1,23 V n'est jamais atteinte dans une vraie pile. Plusieurs facteurs interviennent dans cette perte de tension :

- La surtension d'activation due à la vitesse de la réaction électrochimique. Une certaine énergie d'activation est nécessaire pour démarrer la réaction.
- Le courant interne et les fuites de combustible à travers la membrane existent. Dans le premier cas, on observe un courant dû à une faible conductivité en électrons de la membrane, dans l'autre cas, de l'hydrogène passe par la membrane sans participer à la réaction. Les pertes ohmiques dues au flux d'électrons dans les différents matériaux et au flux d'ions H+ dans la membrane.
- La surtension de concentration due à la concentration des réactants aux électrodes.

Si l'on compare la puissance électrique délivrée à la puissance théorique déduite de l'énergie libre de Gibbs, on trouve le rendement en tension :

$$\eta_{tens} = \frac{V\,I}{-\Delta G\left(\frac{1}{2F}\right)} = \frac{V}{1.23} \qquad \text{(I.16)}$$

Le rendement en tension peut donc être exprimé uniquement à l'aide de la tension délivrée (et de la température si on tient compte de la relation ΔG = f(T)). Ceci facilite beaucoup l'analyse des mesures en fonctionnement d'une pile à combustible.

11.2.3 Rendement énergétique

On définit le rendement énergétique :

$$\eta_{énergie} = \eta_{tens} \cdot \eta_{th} = \frac{V}{-\frac{G}{2F}} \cdot \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{V}{1.48} \qquad \text{(I.17)}$$

La tension de 1,48 V correspond à la tension à vide d'une pile qui transforme toute l'énergie disponible dans les gaz en électricité : le point thermoneutre .Il s'agit donc d'une valeur purement théorique permettant un calcul simple du rendement énergétique à partir de la tension aux bornes de la pile.

Pour notre cas, nous nous intéressons à un autre type de rendement qu'on introduira ultérieurement.

11.2.4 Cumul des rendements

En partant de la source d'énergie (l'hydrogène), on peut distinguer un certain nombre de pertes qui interviennent avant que l'on arrive à l'énergie électrique souhaitée[10]. Une liste des pertes de puissance est donnée dans le tableau I.3.

Hydrogène fourni	
excès d'hydrogène	Rendement en matière
création d'entropie	Rendement énergétique maximal
pertes de tension	Rendement électrique tension
consommation auxiliaires	Rendement du système
énergie électrique récupérée	

Tableau I. 3 : Pertes de puissance dans une pile à combustible .

12.Consommation et production des gaz

Les flux d'hydrogène et d'oxygène consommés par une pile à combustible sont directement proportionnels au courant délivré (équation I.18).

$$F_{gaz} = \frac{n_c \times I}{n \times F} \times \frac{1}{\eta_F} \qquad \text{(I. 18)}$$

Avec

Fgaz flux de gaz (mol.s^{-1})

n_c nombre de cellules de PAC

I courant de PAC (A)

ηF rendement faradique (%)

n nombre de moles d'électrons échangées par mole d'eau (n = 2 pour l'hydrogène, n = 4 pour l'oxygène)

Le rendement faradique ou rendement de courant, ηF provient du fait qu'une partie de l'hydrogène et de l'oxygène migre à travers la membrane et se recombine sans que l'on puisse récupérer l'énergie. Ce rendement est généralement très proche de 1 [11].

12.1 Production d'eau

D'après la demi-équation électrochimique (I.2), on peut voir qu'une mole d'eau est produite pour deux électrons. Donc, la production d'eau (en mol/s) est

$$\dot{n}_{H_2O} = \frac{P_{brute}}{2VF} \quad \text{(I.19)}$$

$$P_{brute} = V\ I\ n_c \quad \text{(I.20)}$$

La masse molaire de l'eau $\bar{M}_{H_2O}$ étant égale à 18.02 x 10^{-3} kg/mol, la production d'eau (en kg/s=1/s en admettant que la densité de l'eau est égale à 1 kg/l) est

$$q_{H2O} = \frac{\bar{M}_{H_2O}\ P_{brute}}{2VF} = 9.34 \times 10^{-8}\ \frac{P_{brute}}{V} \quad \text{(I.21)}$$

12.2 Production de chaleur

La production de chaleur peut être directement déduite du rendement de la pile. En effet, toute l'énergie qui n'est pas convertie en électricité est dégagée sous forme de chaleur.

la tension fictive Efictive (c.-à-d., la tension qui serait obtenue si toute l'énergie était transformée en électricité) de la pile est égale à

- 1,48 volts si l'eau est obtenue sous forme liquide ;
- 1,25 volts si l'eau est obtenue sous forme gazeuse.

La chaleur Q̇ exprimée en watts (ou J/s) peut donc être déduite directement en faisant la différence entre la puissance fictive et la puissance réelle, [12]

$$q_{H2O}=\frac{\bar{M}_{H_2O}\ P_{brute}}{2VF}=9.34x10^{-8}\ \frac{P_{brute}}{V} \quad (I.22)$$

$$\dot{Q} = n_c I\left(E_{fictive} - V\right) \quad (I.23)$$

Ou

$$\dot{Q} = P_{brute}\left(\frac{E_{fictive}}{V} - 1\right) \quad (I.24)$$

Avec :

$E_{fictive}$: la tension fictive.
P_{brute}: la puissance délivrée par la pile.
n_c :le nombre de cellule.
$\bar{M}_{H_2O}$: la masse molaire de l'eau.
V: la tension de la pile.
F:la constante de Faraday est définie comme étant la charge globale d'une mole de charge élémentaire.

13. Conclusion

Nous venons d'étudier à travers ce chapitre des généralités sur la PAC .Nous avons passé en revu les constituants de la PEMFC .

Nous avons vu les différents rendements de la pile, la production de chaleur ainsi que la production de l'eau.

L'intérêt pour la pile à combustible connaît une croissance importante qui se poursuivra sûrement dans les années à venir. Les avantages de la pile à combustible sont nombreux. Ce générateur produit sans bruit de l'énergie électrique et thermique ne produisant que de l'eau et ne rejetant aucun gaz à effet de serre (cela dépend du carburant) .

L'hydrogène vecteur d'énergie non polluant, est appelé à jouer un rôle majeur dans les systèmes énergétiques futurs. Les points durs freinant la commercialisation des piles à combustible sont la durée de vie la gestion de l'eau, liée surtout aux conditions de fonctionnement exigées par la membrane, leur cout élevé du aux matériaux utilisés (tel que le platine un métal précieux) et aux difficultés d'usinage surtout des canaux sur les plaques bipolaires.

Bibliographie

[1]Azzedine Hocine Abdelhak, **«**Modélisation électrique des générateurs électrochimique à membrane échangeuse de protons PEMFC», thèse de magister,USTOMB,2006.

[2]http://www.annso.freesurf.fr/Grove.html

[3]Zerhouni Fatima Zohra, «Développement et optimisation d'un générateur énergétique hybride propre à base de PV-PAC» **,** thèse de doctorat,USTOMB,2009.

[4] Jérôme Lachaize , « Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction », thèse de doctorat, institut national polytechnique de TOULOUSE,2004.

[5]Cècile Gongrand, « Analyse des transferts d'eau dans les micropiles à combustible », thèse de doctorat, institut national polytechnique de TOULOUSE,2006.

[6] Jia, J.; Wang, Y.; Li, Q.; Cham, Y.T.; Han, M.; "Modeling and Dynamic Characteristic Simulation of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell ", IEEE transactions on Energy conversion, 24(1) :283 – 291, March 2009.

[7] A.S. Corbeau. Les piles à combustible. Site internet http ://www.annso.freesurf.fr/, 2003.

[8] Bossel, U. «Does a Hydrogen Economy Make Sense? », Proceedings of the IEEE, 94(10) :1826 – 1837, Oct. 2006.

[9] http://www.annso.freesurf.fr/H2.html , 08/10/2008

[10] Wolfgang Friede, «Modélisation et caractérisation d'une pile a combustible de type PEM», thèse de doctorat, institut national polytechnique de Lorraine,2003.

[11] Séverine Busquet, «Etude d'un système autonome de production d'énergie couplant un champ,un électrolyseur et une pile a combustible :réalisation d'un banc d'essai et modélisation », thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris,2003.

[12]Benjamin Blunier,Abdelatif Miraoui « Piles à combustibles principes, modélisation applications avec exercices et problèmes corrigés », édition ellipses,2007.

Chapitre II

Modélisation d'une Pile à Combustible PEMFC

1. Introduction

Parmi toutes les familles existantes de piles à combustible, nous nous intéresserons aux piles basses températures à membranes polymères échangeuses de protons. Le changement dans les conditions de fonctionnement peut avoir un effet bénéfique ou néfaste sur les performances de la pile et sur les performances du système [1]. Prédire le comportement du système PAC sur l'étendue de ses paramètres de fonctionnement apparaît comme étant de plus en plus indispensable pour parvenir à des applications larges de cette technologie. Donc de meilleures connaissances et compréhension du comportement et du fonctionnement de la PAC doivent être sues. Le logiciel utilisé pour notre simulation est le matlab.

2. Caractéristiques courant tension de la pile à combustible (PEMFC)

Le potentiel réversible théorique de la pile est calculé par l'équation de Nernst.Cette tension est fonction de la température de fonctionnement et des pressions partielles des espèces chimiques. En réalité, le potentiel de la pile est modifié par trois autres sources d'irréversibilité : l'énergie d'activation de la réaction, les surtensions ohmiques et les surtensions liées à l'appauvrissement du milieu réactionnel (dites surtension de concentration).

La tension de pile en charge est donc inférieure à la tension de Nernst. La courbe de polarisation (Figure II.1) montre les trois zones des surtensions. Pour chacune de ces zones, il y a un type de surtension prépondérant par rapport aux autres. Dans la zone 1, à faible densité courant, les surtensions d'activation sont les plus influentes. La zone 2, est une zone linéaire où les surtensions ohmiques sont prépondérantes. Pour la zone 3, à forte densité de courant, les surtensions de concentration sont les pertes majeures. On décrira ultérieurement toutes ces chutes.

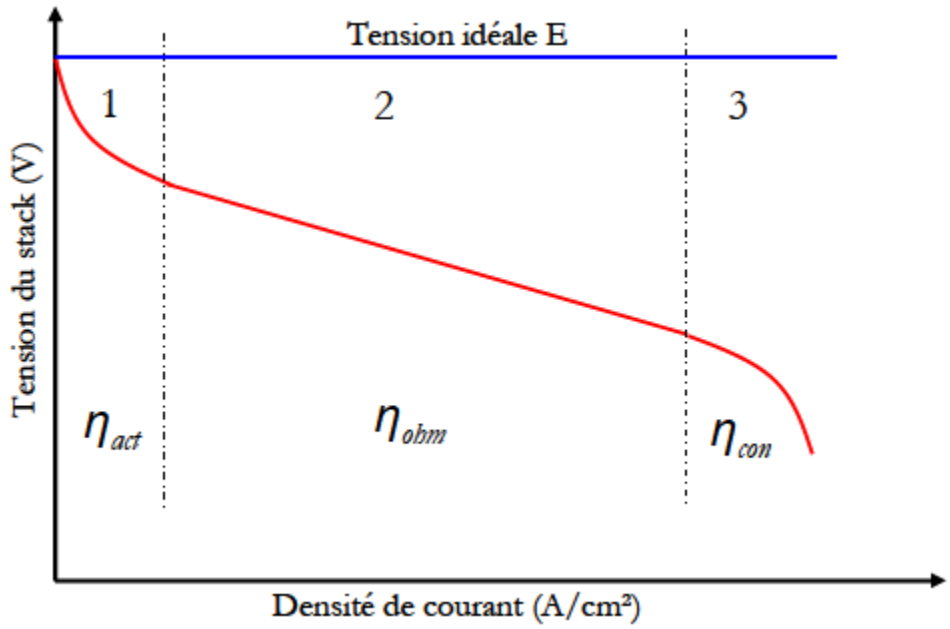


Figure II.1 : Courbe de polarisation théorique

3. Modélisation de la pile PEMFC

La modélisation des piles PEMFC prend une part très importante dans leur développement, car elle facilite la compréhension des phénomènes mis en jeu. Il existe ainsi un grand nombre de modèles de pile PEMFC, qui ont généralement chacun leurs propres spécificités et utilités, suivant les phénomènes étudiés.

Un modèle électrique détermine la tension aux bornes d'un stack en fonction du courant de charge. De façon générale, les modèles électriques sont nombreux dans la littérature scientifique.

Un modèle très précis exige un niveau de complexité très élevé, ce qui a comme conséquence un poids de calcul plus important.

On va voir ci après quelques modèles utilisés dans les travaux de recherche anterieurs.

3.1 Modèle de Kim

Le modèle de Kim est actuellement un modèle de référence pour la modélisation des piles à combustible. Ce modèle est semi-empirique, c'est-à-dire basé sur des équations théoriques mais utilisant des paramètres pour ajuster le modèle aux données expérimentales.

$$V_{cell}(J) = E_0 - b \times log(J) - R \times J - m \times exp(n \times J) \qquad \text{II. 1}$$

Avec

$$E_0 = E_r - b \times log(J_0) \qquad \text{II. 2}$$

où V_{cell} représente potentiel d'une cellule (V)

J est la densité de courant (A/m^2)

E_r est le potentiel réversible de la cellule (V)

J_0, b sont les paramètres appelés paramètres de Tafel pour la réduction de l'oxygène

R est la résistance ohmique ($\Omega.m^2$)

m, n sont des paramètres liés à la diffusion (V, A^{-1})

Les paramètres de cette équation dépendent de la température, de la pression et de la pression partielle en oxygène. Ce modèle permet de représenter toutes les parties d'une courbe de polarisation d'une pile, jusqu'à la zone de diffusion. Il est malheureusement inutilisable pour de faible densité de courant, inférieure à la densité de courant d'échange J_0, en raison du terme $-b \times log\left(\frac{J}{J_0}\right)$ **[2].**

3.2 Modèle interne (N. Albrieux)

Le modèle électrique développé au laboratoire par N. Albrieux est empirique, non divergent en J_0. Ce nouveau modèle permet une cohérence mathématique de l'équation utilisée par rapport à la forme de la courbe caractéristique expérimentale (tension, courant) d'une PAC.

L'équation est la suivante :

$$V_{cell}(J) = E + \frac{b}{ln(d \times J)} - c \times J \qquad \text{II. 3}$$

Le remplacement du terme log J, utilisé dans le modèle de Kim, par le terme en 1/logJ permet la convergence de ce terme en 0 pour J=0.

Certaines hypothèses du modèle électrique sont résumées en [3].

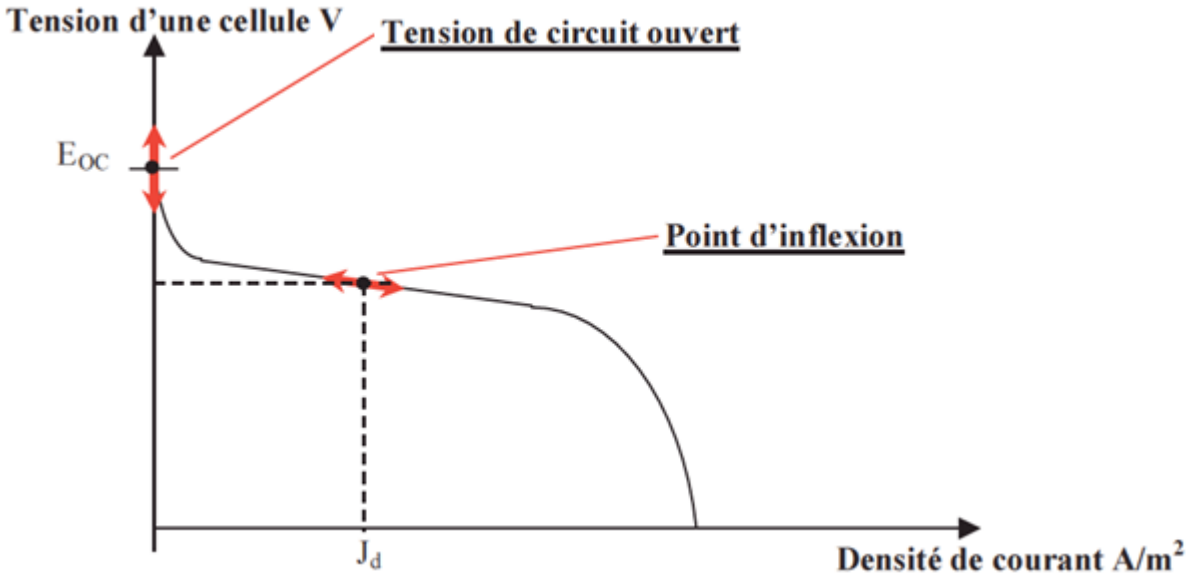


Figure II.2 : Hypothèses du modèle électrique des composants électrochimiques.

L'équation obtenue est alors :

$$V_{cell}(J) = E + \frac{b}{ln\left(\frac{J}{J_d \times e^2}\right)} + \left(\frac{b}{4 \times J_d} - \Delta\right) \times J \qquad \text{II. 4}$$

où

Vcell potentiel d'une cellule (V)

J densité de courant ($A.m^{-2}$)

E_{OC} tension de circuit ouvert de la cellule (V)

Jd, b, Δ paramètres du modèle dépendant de la température et de la pression partielle en oxygène.(A/cm^2,V,Ω/ cm^2).

Les 4 constantes $E_{OC,}$ b, Jd et Δ sont déterminées à partir de résultats expérimentaux. Ces paramètres dépendent de la température T et de la pression partielle en oxygène $P_{O2.}$ Chaque paramètre est dissocié en trois composantes (Équation II.5).

$$\begin{bmatrix} E \\ J_d \\ b \\ \Delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 & E_2 & E_3 \\ J_{d1} & J_{d2} & J_{d3} \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ \Delta_1 & \Delta_2 & \Delta_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ T \\ T \times ln(P_{O_2}) \end{bmatrix} \qquad \text{II.5}$$

Douze constantes doivent être déterminées. Cela nécessite un minimum de 4 couples

(J-Vcell) pour 4 paires { T, P_{O_2} } **[3].**

3.3 Modèle d'Amphlett

Le modèle électrochimique adopté pour cette présente étude est le modèle d'Amphlett. c'est un modèle semi-empirique simple qui prend en compte la plupart des paramètres influents sur les performances de la pile.

Le potentiel thermodynamique théorique de la pile à combustible PEMFC H_2/O_2 à 25 °C et à 1 atm est de l'ordre de 1,23 V, mais le potentiel réel (V_{PAC}) de la cellule décroît par rapport au potentiel thermodynamique d'équilibre quand le courant est débité. Cette déviation

à la valeur du potentiel de Nernst, est due aux pertes irréversibles appelées polarisations η(surtensions) qui sont : la polarisation d'activation, la polarisation ohmique et la polarisation de concentration que nous avions préalablement vues.

Par conséquent, l'expression de la tension d'une cellule s'exprime comme suit [4-5] :

$$V_{PAC} = E_{Nernst} - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{conc} \qquad \text{II. 6}$$

Pour calculer la tension (V_s) de (n_c) piles unitaires reliées en série formant un assemblage [6-7], on utilise :

$$V_s = \text{nc} \times V_{PAC} \qquad \text{II. 7}$$

Dans le cas où l'eau liquide serait le produit de la PEMFC l'expression de l'équation de Nernst [6-8] arrangée avec un calcul numérique se présente comme suit [9] :

$$E_{Nernst} = 1.229 - 0.85T^{-3} \cdot (T - 298.15) + 4.3110^{-5} \cdot T \cdot \left[ln\left(P_{H_2}^{\cdot}\right) + \frac{1}{2} ln\left(P_{O_2}^{\cdot}\right)\right] \text{II. 8}$$

où T est la température opératoire absolue de la pile (K), $P_{H_2}^{\cdot} et\ P_{O_2}^{\cdot}$ sont les pressions partielles à l'interface respectivement de l'hydrogène et de l'oxygène (atm), dans le cas d'une pile PEMFC produisant de l'eau liquide.

3.3.1 Caractéristiques de polarisation d'une pile à combustible PEMFC

On peut distinguer sur la courbe caractéristique V-I déjà vue en figure(II.2) de la pile PEMFC, trois domaines différents, qu'on appelle également courbes de polarisation .

Chaque polarisation est une chute de tension dominante dans une région particulière de densité de courant (faible, moyenne, ou élevée) [10]. Les données relatives à des tensions élevées représentent des mesures effectuées à des faibles densités de courant, alors que les données pour des tensions faibles sont pour des mesures faites à des densités de courant élevées [11]. Les densités de courant qu'on peut obtenir (en A/cm^2) varient en fonction, de la température de la pile, de la densité du catalyseur, de la stoechiométrie et de l'alimentation en gaz réactifs. A l'heure actuelle, la valeur de 0,8 A/cm^2 est une densité de courant appréciable, mais certaines piles peuvent atteindre les 2 A/ cm^2 [7-11].

3.1.1.1 Aux faibles densités de courant

La décroissance logarithmique du potentiel est déterminée principalement par la somme des surtensions à l'anode et à la cathode correspondant aux équations de Butler-Volmer et par la cinétique lente de transfert de charge dans les zones actives [10-11], c'est-à-dire dans les zones de réactions électrochimiques dont une contre réaction est présente sur les surfaces des électrodes poreuses et aussi déterminée par d'autres processus activés, parmi lequel la réduction de l'oxygène est la plus lente [12-13]. On peut améliorer ces pertes en augmentant la température [14].

L'expression simple proposée par J.C. Amphlett et al[15]. pour toute la surtension d'activation est exprimée dans l'équation (II.9)

$$\eta_{act} = \xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T ln\left(C_{O_2}^{\cdot}\right) + \xi_4 T ln(I_{PAC}) \qquad \text{II. 9}$$

Où I_{PAC} est le courant de fonctionnement de la pile (A) et ξ1, ξ2, ξ3 et ξ4 sont des coefficients paramétriques [5],[8-16] dont leurs valeurs dans les équations empiriques sont données dans les tableaux (II.1,II.2,II.3).

$C_{O_2}^{\cdot}$ représente les concentrations de l'oxygène (mol/cm^3) dissout dans un film d'eau à l'interface de la membrane gaz/liquide sur la surface catalytique de la cathode, elle est exprimée en fonction de sa pression par la loi de Henry [17] :

$$C_{O_2}^{\cdot} = \frac{P_{O_2}^{\cdot}}{5.08\ 10^6 e^{-\left(\frac{498}{T}\right)}} \qquad \text{II. 10}$$

A des basses densités de courant, la forme de la courbe est principalement déterminée par la polarisation d'activation de la cathode. La cathode est généralement l'électrode qui limite la performance d'exécution de la pile à combustible PEMFC, car la densité de courant d'échange de la réaction de réduction de l'oxygène est basse, elle est approximativement de l'ordre 5 à 6 fois inférieure à celle de la réaction au niveau de l'anode .

Etant donné qu'on utilise de l'oxygène pur pour les travaux expérimentaux [17].

$$P_{O_2}^{\cdot} = P_{cath} \cdot \left[1 - x_{H_2O}^{sat}\right] \qquad \text{II. 11}$$

P_{cath}est la pression de l'oxygène à la cathode, $x_{H_2O}^{sat}$ la fraction molaire de saturation de l'eau dans le gaz humidifié et supposée ≈à 50 %, on obtient alors :

$$P_{O_2}^{\cdot} = \frac{1}{2} \cdot P_{cath} \qquad \text{II. 12}$$

A l'anode, on utilise de l'hydrogène pur [17],

$$\dot{P_{H_2}} = P_{anode} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot x_{H_2O}^{sat}\right] \quad \text{II. 13}$$

P_{anode} est la pression de l'hydrogène à l'anode,et $x_{H_2O}^{sat}$=0.5, l'équation (II. 13) devient:

$$\dot{P_{H_2}} = \frac{3}{4} \cdot P_{anode} \quad \text{II. 14}$$

3.3.1.2 Aux densités de courant moyennes

On observe un phénomène établi par une décroissance de la tension de la pile presque linéaire avec augmentation du courant. Ce phénomène nommé polarisation ohmique, proportionnelle au courant, est liée aux résistances électroniques dans les plaques bipolaires, électrodes et connexions en série de l'assemblage et liée aussi aux résistances ioniques internes, diminuant la tension entre électrodes. Cette chute de tension se détermine principalement par la résistivité de la membrane polymère solide au transfert de protons, qui est supérieure à toutes les autres. En effet, il s'agit, dans la membrane électrolyte polymère, d'une conduction ionique. Or, les ions ayant une mobilité bien plus faible que les électrons, la résistance de la membrane est bien plus grande [13-18].

Ceci peut être exprimé par l'utilisation de la loi d'Ohm,

$$\eta_{ohm} = I_{PAC} \cdot (R_M + R_C) \quad \text{II. 15}$$

Rc est la résistance équivalente de contact à la conduction des électrons, R_M est la résistance équivalente de la membrane à la conduction des protons, elle est calculée à partir de la relation suivante :

$$R_M = \frac{r_M \cdot l}{A} \quad \text{II. 16}$$

Où l est l'épaisseur de la membrane (µm), r_M est la résistance spécifique de la membrane (Ω.cm) [5-8], obtenue par la relation suivante :

$$r_M = \frac{181.6\left[1+0.03\left(\frac{I_{PAC}}{A}\right)+0.062\left(\frac{T}{303}\right)^2 \cdot \left(\frac{I_{PAC}}{A}\right)^{2.5}\right]}{\left[\lambda_{H_2O/SO_3^-} - 0.634 - 3\left(\frac{I_{PAC}}{A}\right)\right] \cdot exp\left[4.18\left(\frac{T-303}{T}\right)\right]} \quad \text{II. 17}$$

Le terme $\frac{181.6}{\left(\lambda_{H_2O/SO_3^-}-0.634\right)}$ représente la résistance spécifique de la membrane (Ω.cm) à I_{PAC} = 0 et à une température de 30 °C (T = 303 K). Le terme exponentiel au dénominateur est le facteur de correction de la température si cette dernière n'est pas à 30 °C.

λ_{H_2O/SO_3^-} est la teneur en eau dans la membrane, admettant une valeur minimale et maximale respectivement de 0 et de 22 [14-20]. A est la surface active de la pile (cm^2).

En remplaçant les équations (II.17) et (II.16) dans l'équation (II.15), l'expression de la polarisation ohmique devient :

$$\eta_{ohm} = \frac{I_{PAC}}{A}\left[\frac{181.6\left[1+0.03\left(\frac{I_{PAC}}{A}\right)+0.062\left(\frac{T}{303}\right)^2\cdot\left(\frac{I_{PAC}}{A}\right)^{2.5}\right]}{\left[\lambda_{H_2O/SO_3^-}-0.634-3\left(\frac{I_{PAC}}{A}\right)\right]\cdot exp\left[4.18\left(\frac{T-303}{T}\right)\right]}\cdot 1 + A\cdot R_C\right] \qquad \text{II. 18}$$

3.3.1.3 Aux densités de courant élevées

A des densités de courant élevées, c'est la cinétique de diffusion des gaz à travers les électrodes qui devient le facteur limitant due aux gradients de concentration des réactifs [13], et à partir d'une certaine quantité de courant demandée, l'alimentation en molécules d'oxygène ne peut plus suivre, et la tension chute rapidement [13-18]. Donc ,on observe une décroissance proportionnelle à la densité de courant. Ces pertes sont données par la relation suivante [6-21-22] :

$$\eta_{con} = -B\left(1-\frac{J}{Jmax}\right) \qquad \text{II. 19}$$

où B est une constante empirique qui dépend du type de pile et de son état de fonctionnement[23]. J est la densité de courant du fonctionnement permanente (A/cm^2).Jmax est la densité de courant maximale.

3.3.1.4 Potentiel réel global

On obtient le potentiel réel global de la pile à combustible PEMFC en remplaçant les équations (II. 8) (II. 9) (II.18) et (II.19) dans l'équation (II.6) :

$$V_{PAC} = 0.2817 - 0.85\ 10^{-3}(T - 298.15)$$
$$+ 4.308\ 10^{-5} T \left[ln\left(\frac{3}{4} P_{anode}\right) + \frac{1}{2} ln\left(\frac{1}{2} \quad P_{cath}\right)\right]$$
$$+ \left[2.86\ 10^{-3} + 210^{-4}\ ln(A) + 4.3\ 10^{-5} ln\left(\frac{\frac{3}{4} P_{anode}}{1.0910^{6} exp\left(\frac{77}{T}\right)}\right)\right] \cdot T$$
$$+ \quad 7.610^{-5} T ln\left(\frac{\frac{1}{2} \cdot P_{cath}}{5.0810^{6} \cdot e^{-\left(\frac{498}{T}\right)}}\right) - 1.93\ 10^{-4} T ln(i_{PAC})$$
$$- i_{PAC}\left[\frac{\left[1 + 0.03\left(\frac{i_{PAC}}{A}\right) + 0.062\left(\frac{T}{303}\right)^{2}\left(\frac{i_{PAC}}{A}\right)^{2.5}\right]}{\left[\lambda_{H_2O/SO_3^-} - 0.0634 - 3\left(\frac{i_{PAC}}{A}\right)\right] \cdot exp\left[4.18\left(\frac{T - 303}{T}\right)\right]} + R_C\right]$$
$$+ B\left(1 - \frac{J}{J_{max}}\right) \qquad \text{II. 20}$$

Cette équation finale représente le comportement électrochimique statique de la pile à combustible. Un circuit électrique équivalent peut être utilisé pour la modélisation du comportement dynamique de la pile [19-21], il est représenté dans la figure (II.3).

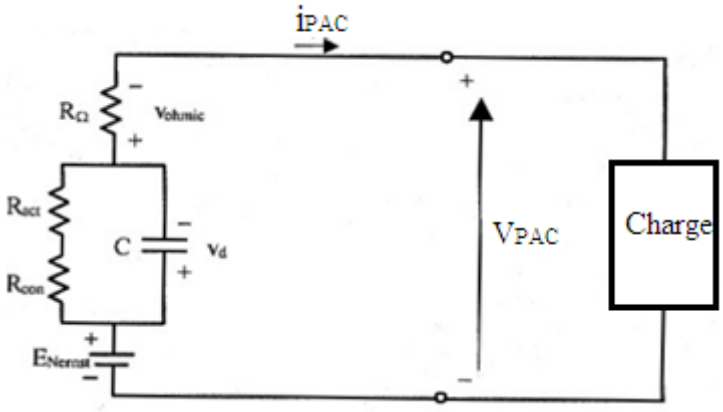


Figure II.3 : Schéma électrique dynamique équivalent d'une pile .

Dans ce circuit électrique équivalant, l'écart des tensions d'activation et de concentration (représenté par les résistances Ract et Rcon, respectivement) est causé par l'effet de la double couche de charge. Sachant que ce phénomène apparaît quand il y a une accumulation de charges entre deux matériaux différents qui sont en contact direct, alors, la couche de charge dans l'interface électrode/électrolyte se comporte comme un condensateur.

4. Application du modèle aux piles AvistaSR12, BCS500W, BallardV

Pour disposer d'une modélisation de la PEMFC, nous avons adopté le modèle d'AMPHLETT. Les divers paramètres utilisés sont avancés dans les tableaux ci-dessous. Nous avons appliqué cette modélisation sur diverses PEFMC.

Param.	Valeur	Param.	Valeur
T	343 K	ξ_1	-0.948
A	50.6 cm^2	ξ_2	$0.00286+0.0002.\ln A+(4.3.10^{-5}).\ln c_{H_2}$
ℓ	178 µm	ξ_3	$7.6.10^{-5}$
P_{H_2}	1 atm	ξ_4	$-1.93.10^{-4}$
P_{O_2}	1 atm	ψ	23
B	0.016 V	J_{max}	1500 mA/cm^2
R_C	0.0003 Ω	J_n	1.2 mA/cm^2

Tableau II.1 :Paramètres d'une cellule de la pile Ballard V[24].

Param.	Valeur	Param	Valeur
n	48	ξ_1	-0.948
T	323 K	ξ_2	$0.00286+0.0002.\ln A+(4.3.10^{-5}).\ln c_{H_2}$
A	62.5 cm^2	ξ_3	$7.22.10^{-5}$
ℓ	25 µm	ξ_4	$-1.0615.10^{-4}$
P_{H_2}	1.47628 atm	ψ	23
P_{O_2}	0.2095 atm	J_{max}	672 mA/cm^2
B	0.15 V	J_n	22 mA/cm^2
R_C	0.0003 Ω	I_{max}	42 A

Tableau II.2 : Paramètres d'une cellule de la pile Avista SR-12[24].

Param.	Valeur	Param.	Valeur
n	32	ξ_1	-0.948
T	333 K	ξ_2	$0.00286+0.0002.\ln A+(4.3.10^{-5}).\ln c_{H_2}$
A	64 cm^2	ξ_3	$7{,}6.10^{-5}$
ℓ	178 µm	ξ_4	$-1{,}93.10^{-4}$
P_{H_2}	1 atm	ψ	23
P_{O_2}	0.2095 atm	J_{max}	469 mA/cm^2
B	0,016 V	J_n	3 mA/cm^2
R_C	0.0003 Ω	I_{max}	30 A

Tableau II.3 : Paramètres d'une cellule de la pile BCS 500 W[24].

Nous allons donc nous intéresser aux diverses courbes obtenues .

4.1. Courbe de polarisation

La caractéristique de polarisation (tension-densité de courant) est obtenue en utilisant l'équation (II.20) ainsi que les paramètres du tableau (II.1,II.2,II.3).

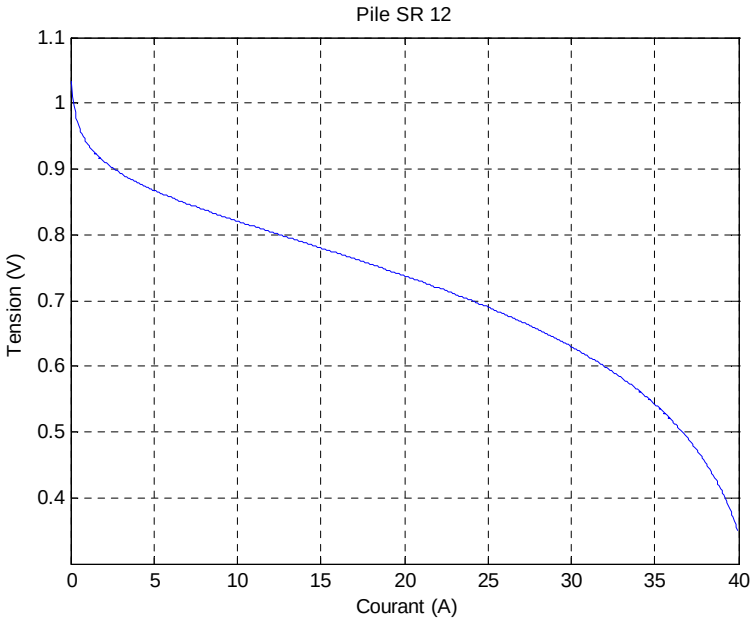


Figure II.4 : Courbe de polarisation de la pile Avista SR-12

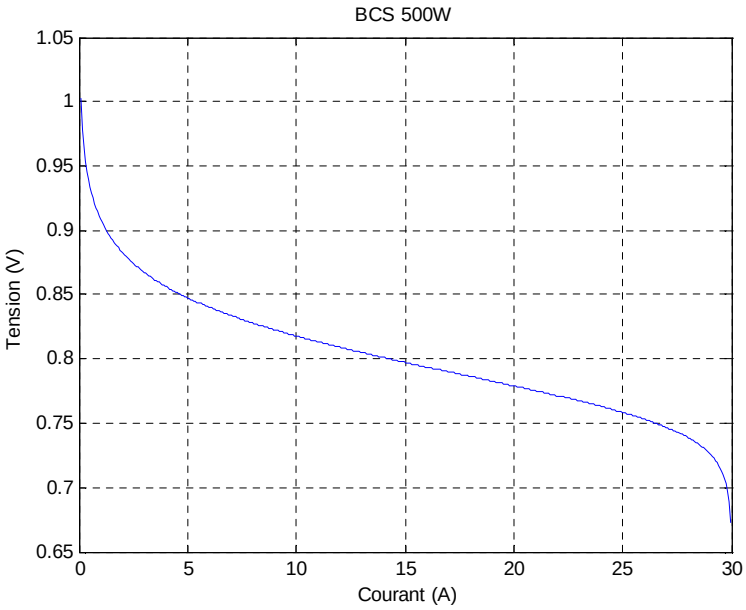


Figure II.5 : Courbe de polarisation de la pile BCS 500W

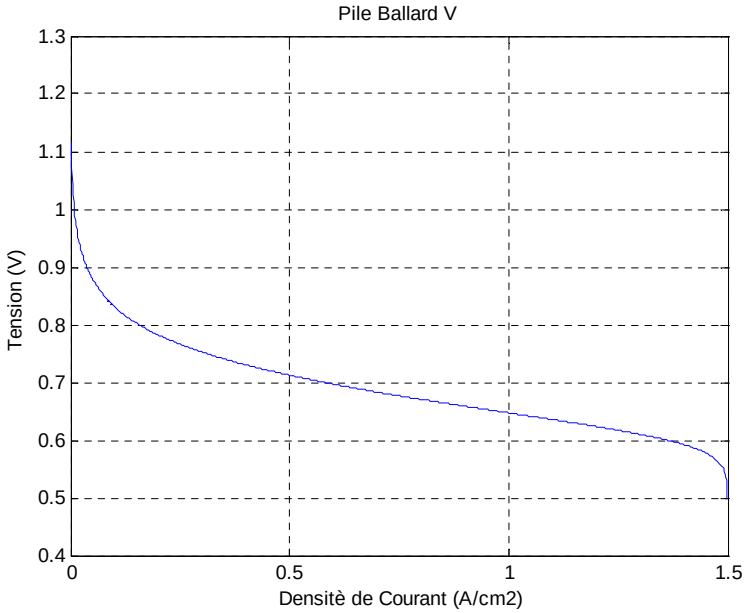


Figure II.6 : Courbe de polarisation de la pile Ballard V

Nous remarquons d'après les courbes obtenues que la caractéristique est non linéaire et qu'elle se divise comme précité en trois zones. Une augmentation de courant implique une baisse de tension et inversement.

4.2. Courbe d'efficacité

Nous nous tournons à présent aux différentes courbes d'efficacité en fonction du courant. On rappelle que l'efficacité est :

$$\eta_{tot} = \frac{V_{PAC}}{\text{Efictive}} * \eta F \qquad \text{II.21}$$

Efictive =1.48 V si l'eau est produite sous forme liquide.

=1.25 V si l'eau est produite sous forme gazeuse.

En générale ,l'eau est produite sous forme liquide et la valeur la plus couramment utilisée est Efictive =1.48 V.

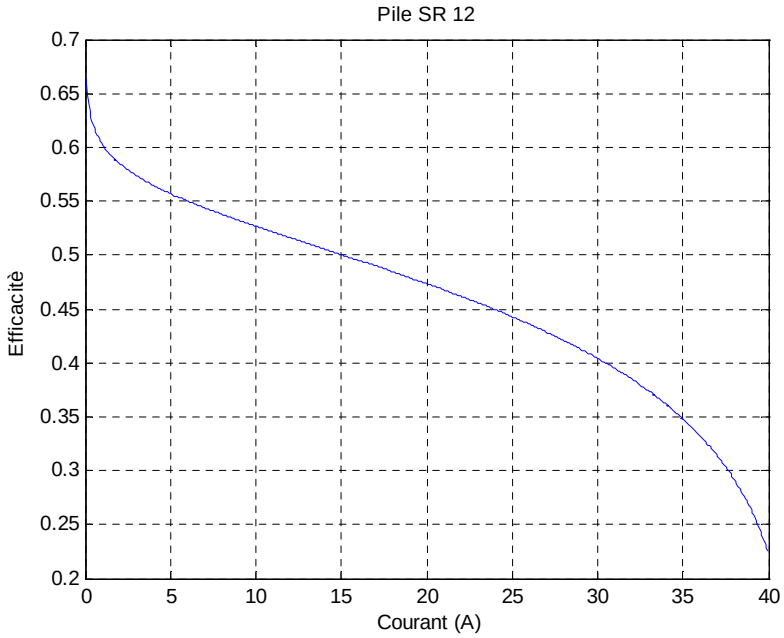


Figure II.7 : Courbe d'efficacité de la pile SR-12

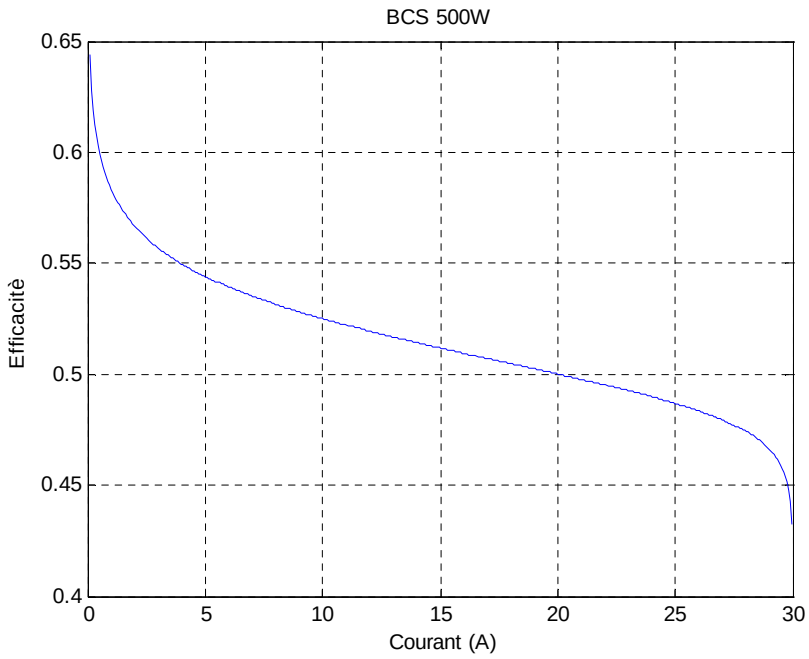


Figure II.8 : Courbe d'efficacité de la pile BCS 500W

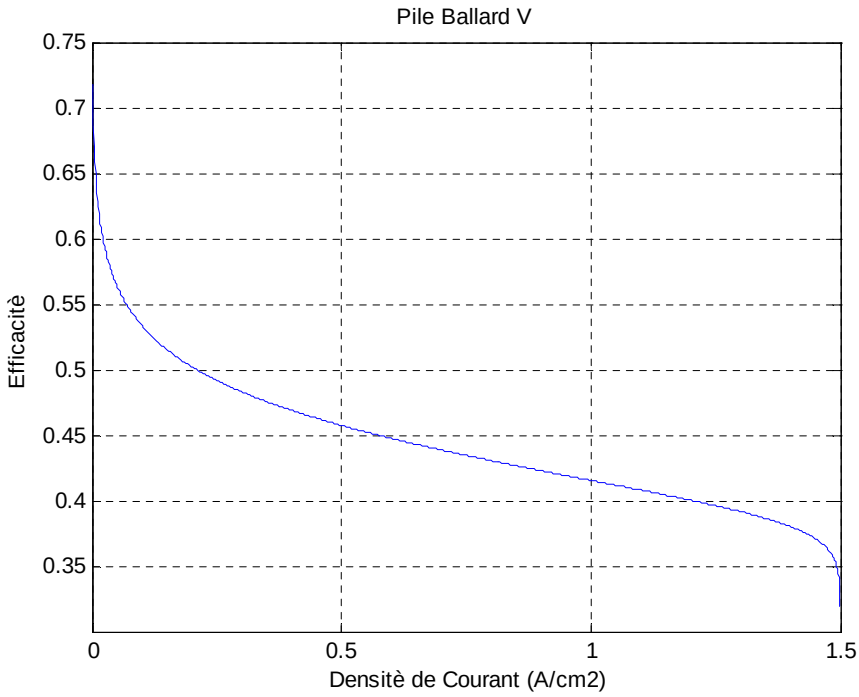


Figure II.9 :Courbe d'efficacité de la pile Ballard V

Nous observons une chute de cette efficacité pour chaque PEMFC vis-à-vis d'une augmentation du courant. De façon contraire, une augmentation de cette dernière est traduite par une diminution du courant.

4.3.Courbe de rendement

Le rendement a été formulé par l'équation (II.22). Son tracé en fonction du courant est représenté par les figures qui suivent.

$$\eta_{v=}\frac{V_{PAC}}{1.23}. \qquad \text{II.22}$$

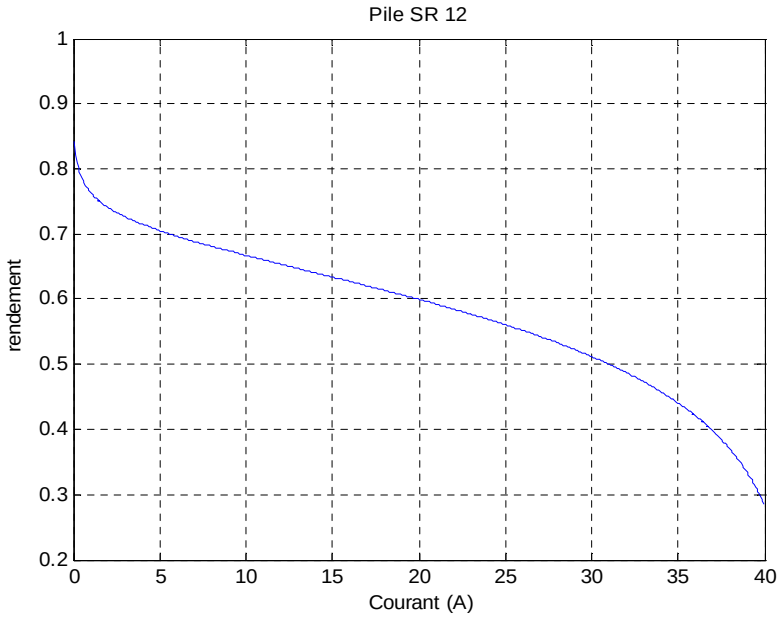


Figure II.10 :Courbe de rendement de la pile Avista SR-12

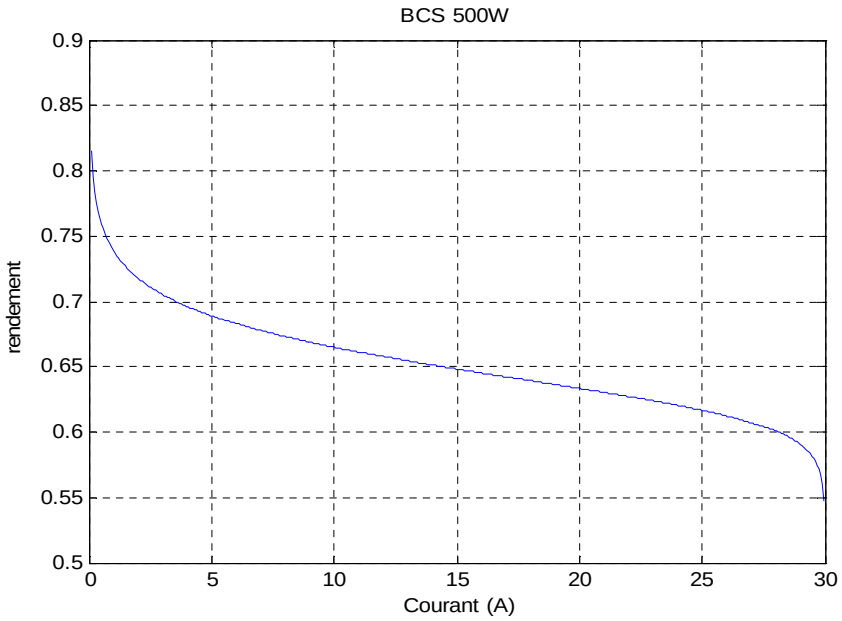


Figure II.11 :Courbe de rendement de la pile BCS 500W

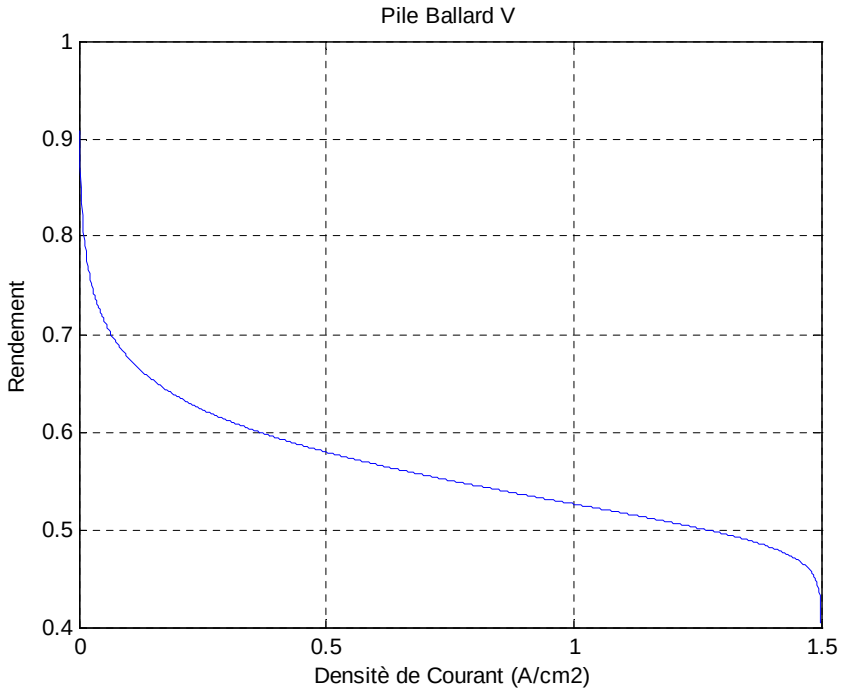


Figure II.12 : Courbe de rendement de la pile Ballard V

Nous remarquons qu'une augmentation de ce rendement est obtenue avec une baisse du courant.

4.4.Courbe de puissance

Nous avons tracé les différentes courbes de puissance vis-à-vis au courant en utilisant l'équation (II.23).

$$P_{PAC}=V_{PAC}*I_{PAC} \qquad (II.23)$$

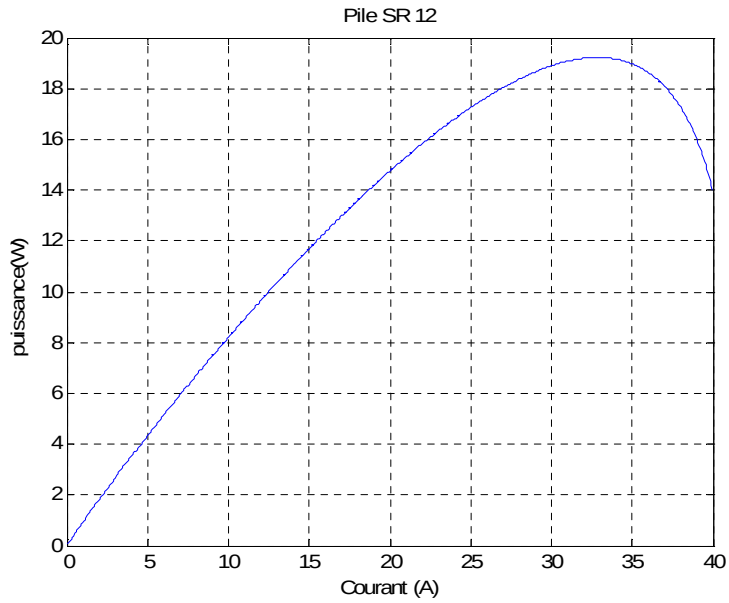


Figure II.13 : Courbe de puissance de la pile Avista SR-12

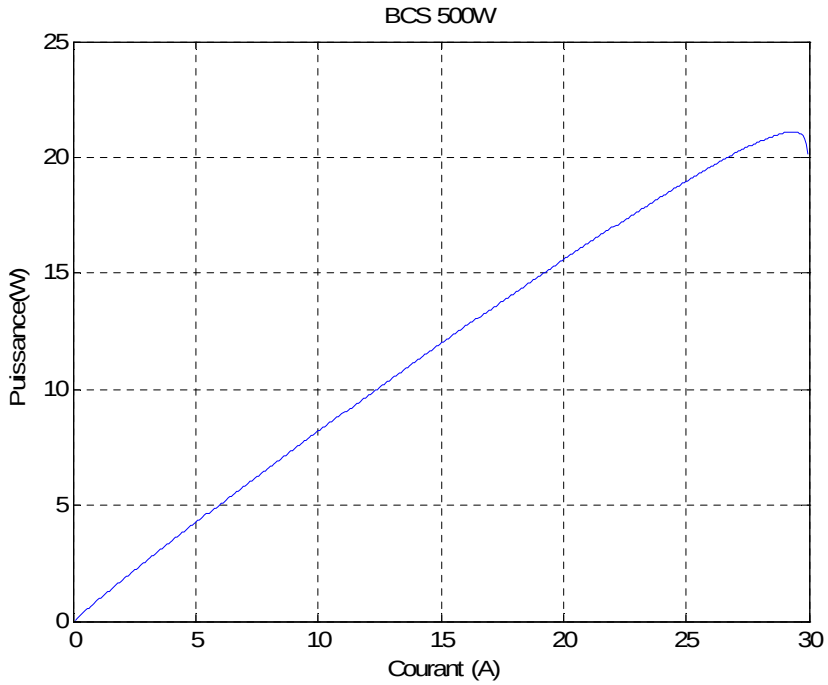


Figure II.14 :Courbe de puissance de la pile BCS 500W

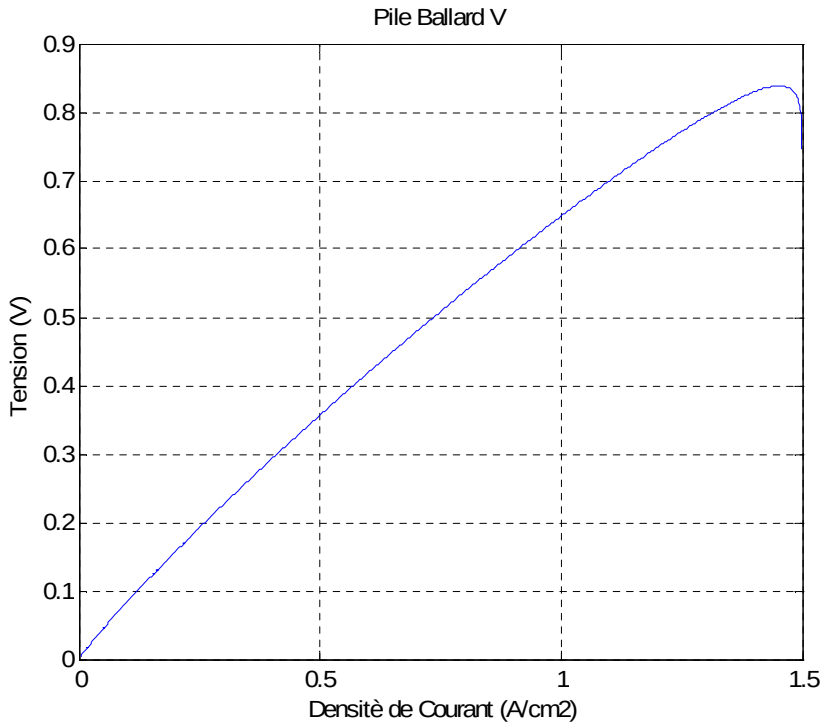


Figure II.15 : Courbe de puissance de la pile Ballard V

5.Effet des paramètres sur la pile avista SR-12

L'équation donnée par le modèle d'Amphlett est tributaire de plusieurs paramètres. Le but de cette présente étude est de voir l'influence des paramètres du tableau (II.2) comme la température , la pression… sur la courbe statique d'une cellule de la pile avista SR-12 prise à titre d'exemple [17-24].

5.1. Effet de la température

On a maintenu la pression de l'hydrogène et de l'oxygène à 1atm et on a fait varier la température. Les températures prises à titre d'exemple sont 25 °C,50 °Cet 75°C.

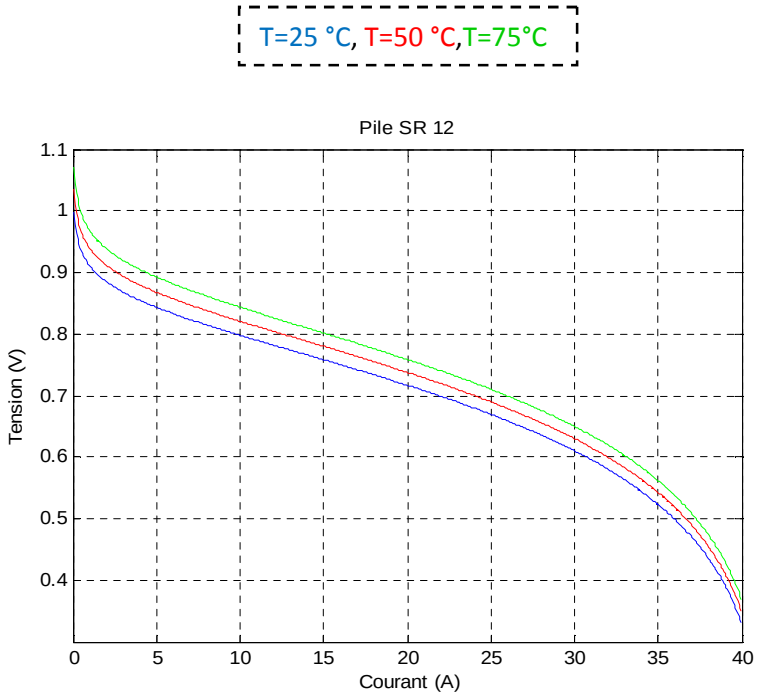


Figure II.16 :Effet de la température sur la réponse de la pile

La température de fonctionnement de la pile a une influence positive sur l'augmentation de la tension de la pile pour un courant constant. En effet, l'augmentation de la température de fonctionnement provoque la diminution de la résistance ohmique de l'électrolyte et accélère la cinétique des réactions. Il faut noter que l'augmentation de la température doit être limitée car elle entraine la déshydratation de la membrane.

5.2.Effet de la pression

A présent, on fixe une température à 25°C et on étudie l'effet de la pression sur la courbe statique de la PEMFC.

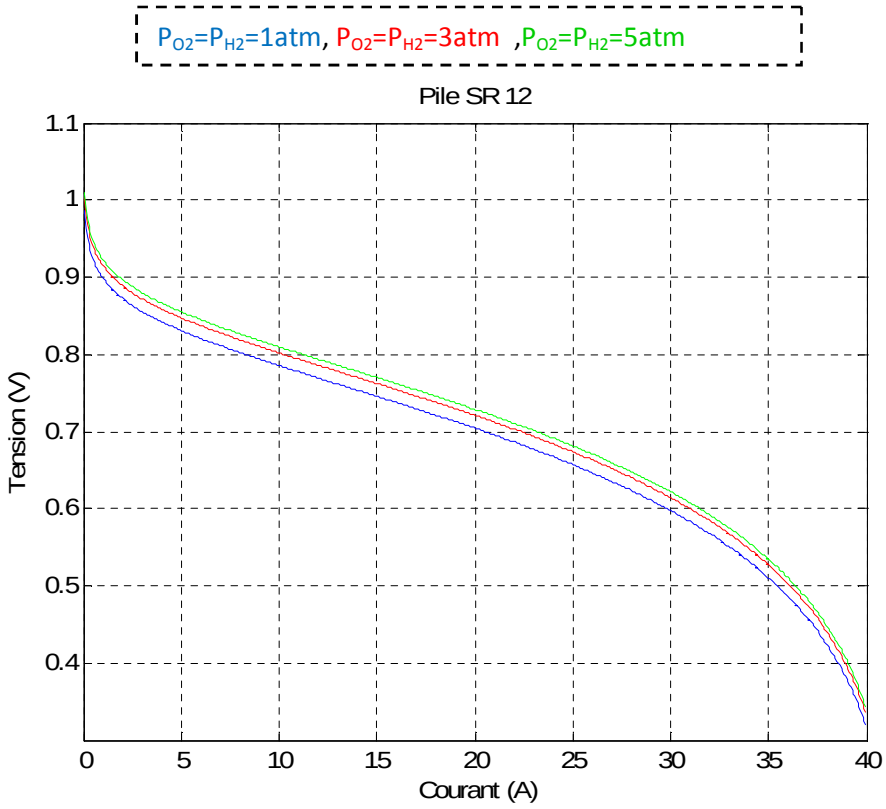


Figure II.17 :Effet de la pression sur la réponse de la pile

La figure (II.17) montre l'influence de la pression sur les performances d'une cellule PEMFC à 25°C. Comme observé sur la figure (II.17), l'augmentation de la pression provoque une augmentation de la tension de la cellule pour un courant constant. L'augmentation de la pression permet d'augmenter les pressions partielles de gaz ce qui augmente la tension de Nernst. L'augmentation de la pression doit être surveillée afin de ne pas dégrader la membrane.

En résumé, la tempèrature et la pression sont deux paramètres clès dans le fonctionnement d'une pile à combustible. Leur augmentation augmente les performaces de la pile. Ces deux paramètres ont une influence positive sur la caractéristique statique de la PEMFC.

5. 3 Effet du paramètre A

A prèsent pour une pile Avista SR12,nous allons voir l'influence du paramètre A de notre modèle sur la caratctéristique V-I de la PAC.

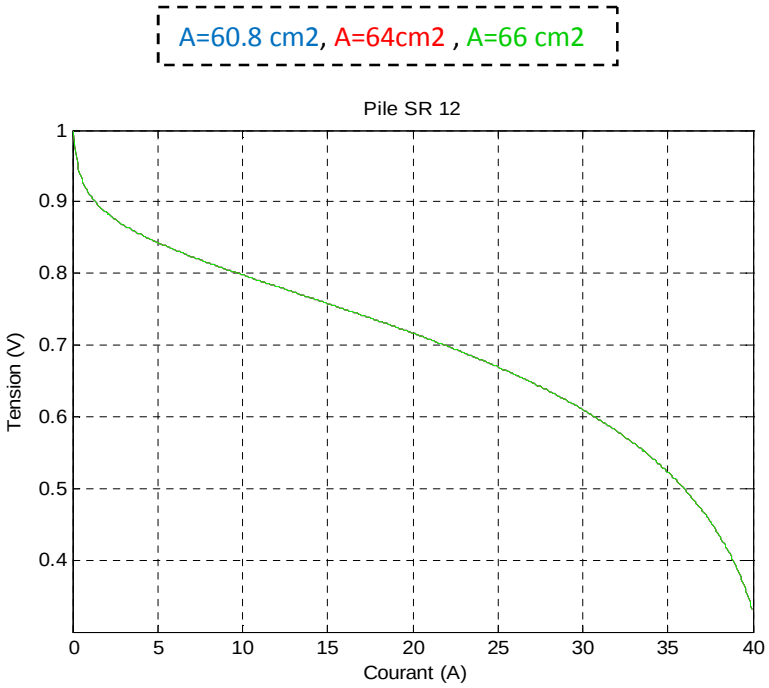


Figure II.18 : Effet du paramètre A sur la réponse de la pile

5.4 Effet du parametre L

Nous allons nous tourner vers l'impact du changement de L sur la caractéristique V-I de la PAC.

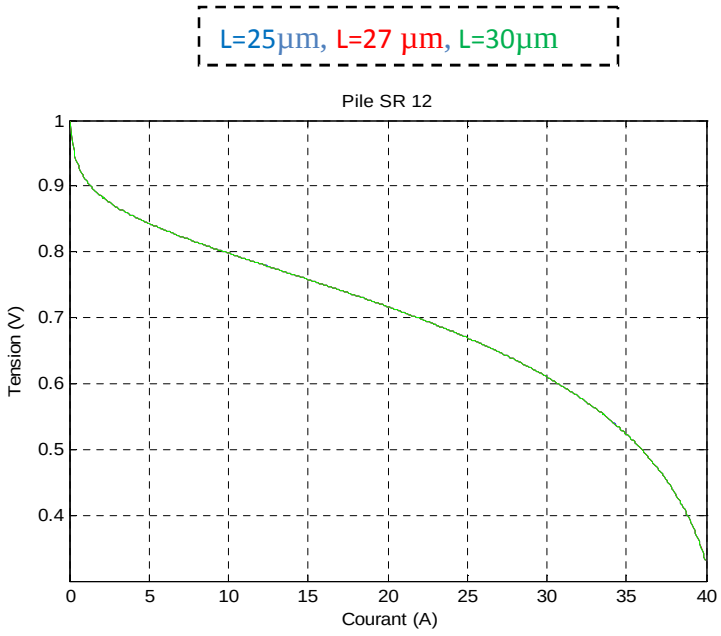


Figure II.19 : Effet du paramètre L sur la réponse de la pile

5.5 Effet du parametre Rc

L’influence du paramètre Rc sur la caractéristique V-I de la PAC.

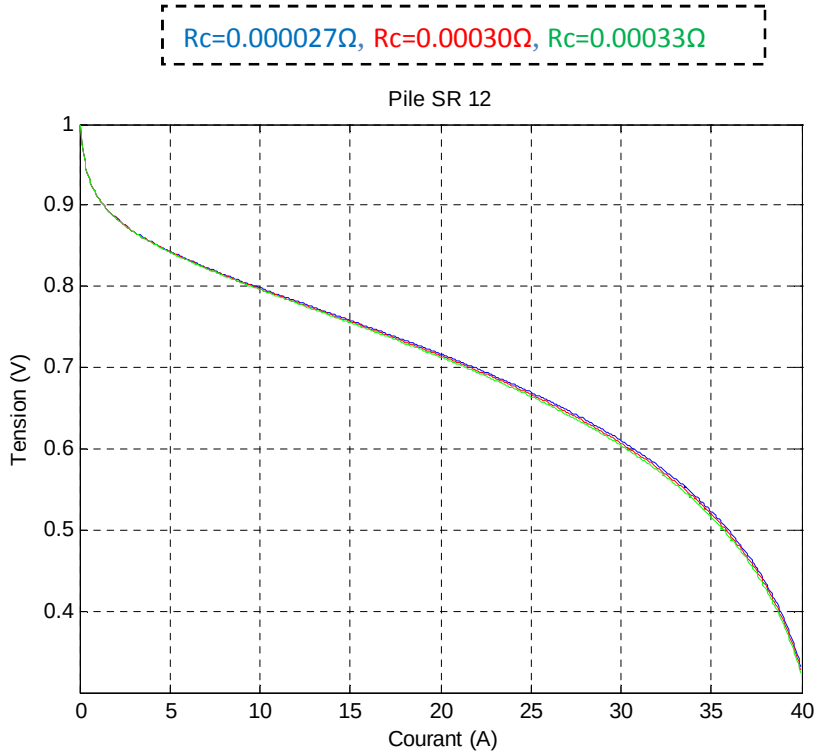


Figure II.20 : Effet du paramètre Rc sur la réponse de la pile

On remarque que l’influence des paramètres A,L,et Rc est trés faible. Les courbes de polarisations obtenues pour differentes valeurs des ces parametres sont superposèes.

5.6 Effet du paramètre B

L’effet du paramètre B est étudié dans cette partie.

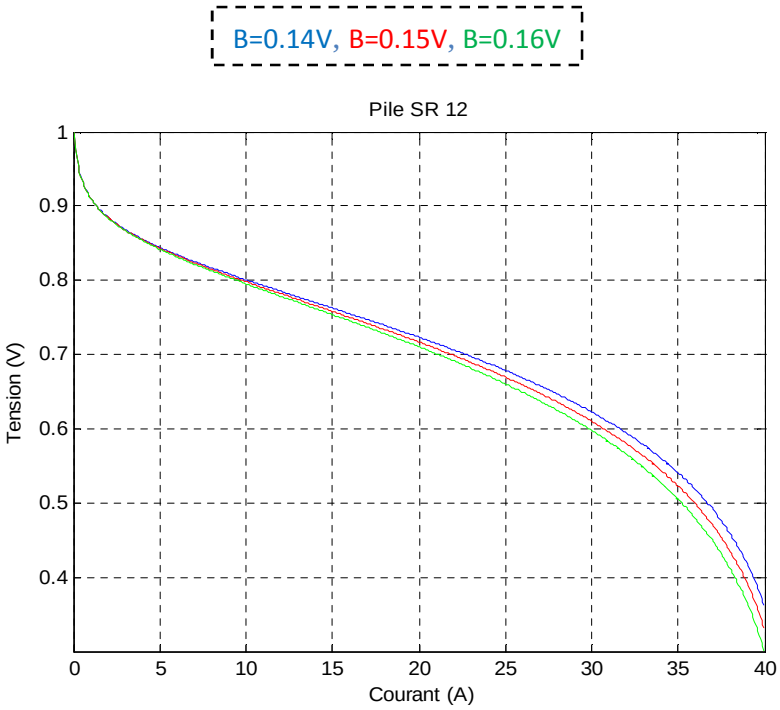


Figure II.21 : Effet du paramètre B sur la réponse de la pile

Le coefficient B affecte la polarisation de concentration .Par conséquent son influence n'est relativement sensible que lorsque le courant s'approche de sa valeur limite.

5.7 Effet du paramètre imax

Pour le paramètre imax, nous allons voir l'influence de sa variation sur la caractéristique V-I de la PAC.

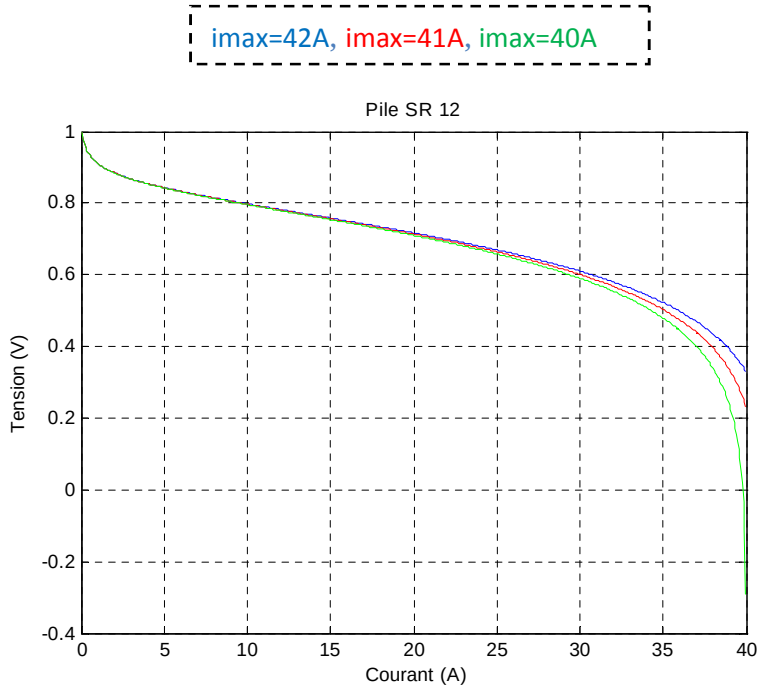


Figure II.22 : Effet du paramètre imax sur la réponse de la pile

Le modèle est quasiment insensible à ce paramètre. Au delà d'une valeur de courant de 26A, la polarisation de concentration est très dépendante de ce paramètre .Elle diminue avec l'augmentation de ce dernier.

5.8 Effet du paramètre ξ1

l'influence du paramètre ξ1 sur la caratctéristique V-I de la PAC est simulèe dans cette figure.

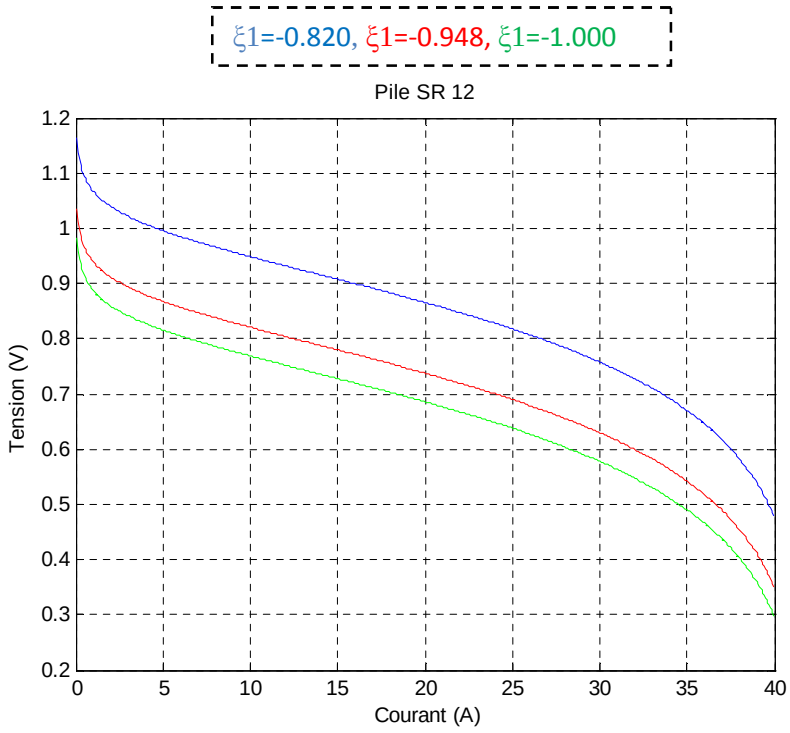


Figure II.23 : Effet du paramètre ξ1 sur la réponse de la pile

On remarque que l'augmentation du paramètre ξ1 entraine une augmentation de la caractéristique V-I de la PAC.

5.9 Effet du paramètre ξ3

A présent, on s'intéresse à voir l'impact de ξ3 sur la caractéristique V-I de la PAC.

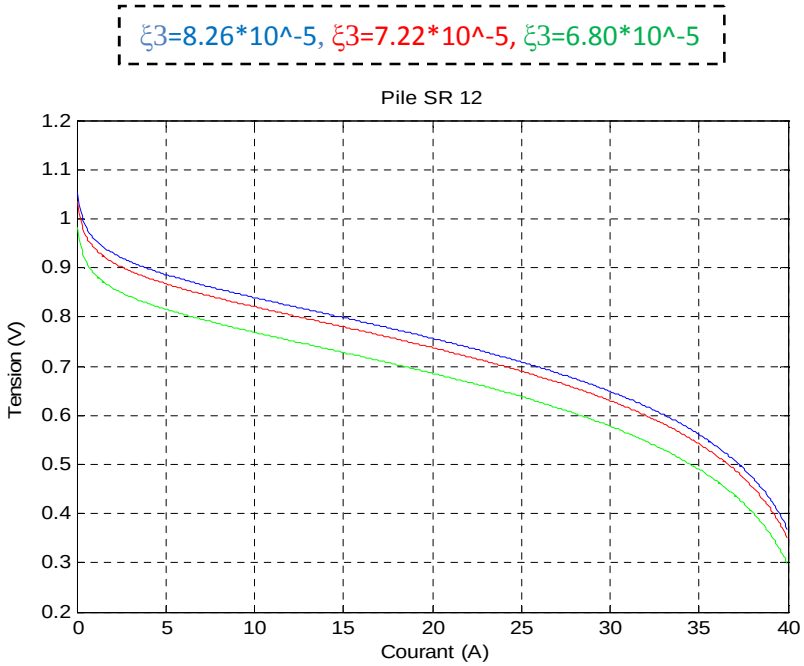


Figure II.24 : Effet du paramètre ξ3 sur la réponse de la pile

On constate que l'augmentation de la caractéristique V-I de la PAC est proportionnelle à l'augmentation du paramètre ξ3.

Les deux paramètres ξ1 et ξ3 présentent une grande influence sur la réponse de la pile, la sensibilité du modèle à ces deux paramètres est importante pour toutes les valeurs de courant.

5.10 Effet du paramètre ξ4

ξ4 est le paramètre étudié pour voir son impact sur la caractéristique V-I de la PAC.

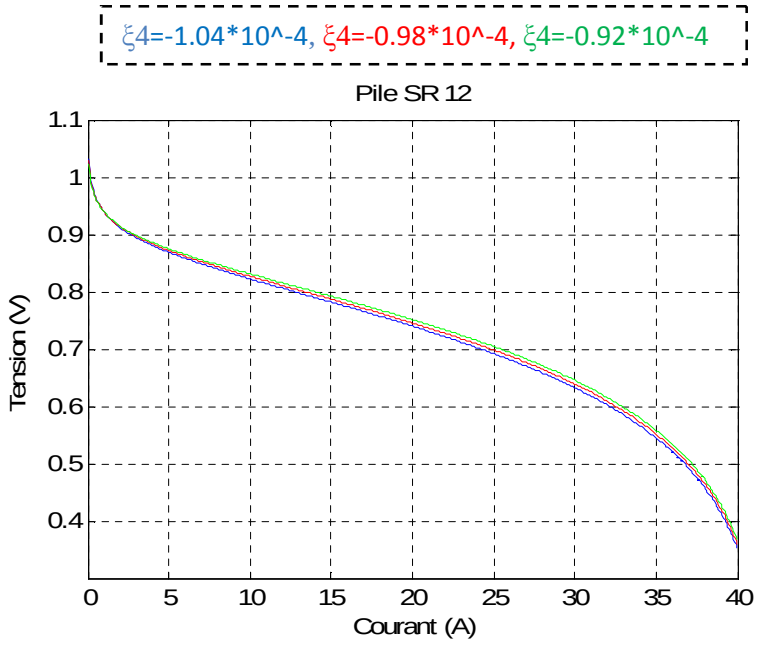


Figure II.25 : Effet du paramètre ξ4 sur la réponse de la pile

On remarque la courbe de polarisation augmente avec l'augmentation de ce paramètre mais son influence est très faible.

6. Comparaison entre la puissance d'un stack de la pile SR12 avec BCS500W

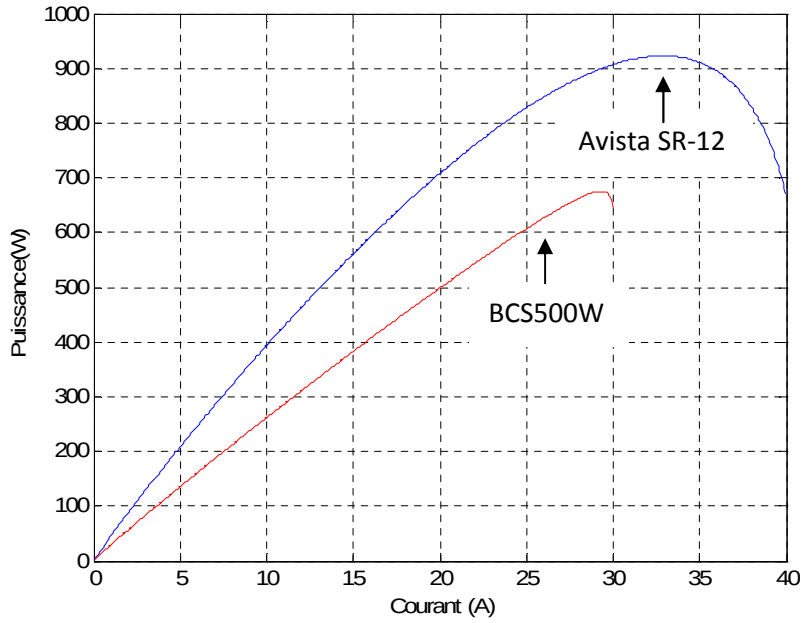


Figure II.26 : Comparaison entre la puissance d'un stack de la pile avec la pile SR-12 et BCS 500W

On remarque que la puissance du stack de la pile SR-12 est plus grande que celle du stack de la pile BCS 500 W, Par exemple pour un courant de 25 A, la puissance est de 847.4W pour la première pile tandis que la puissance est de 606.8W pour la deuxième pile.

Ceci pour dire que chaque type de PEMFC, pour des conditions fixes fournit une puissance donnée différente de celle d'un autre type.

7 .Simulation de consommation d'hydrogène d'une pile à combustible

Pour simuler la consommation d'hydrogène d'un PAC, nous avons utilisé l'équation(I.18).

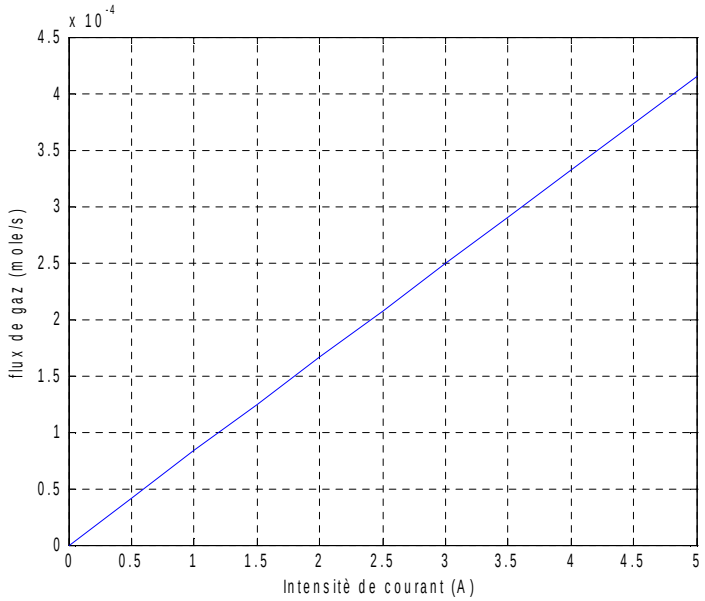


Figure II.27 :Consommation d' hydrogène d'une pile à combustible

Nous remarquons que le flux augmente avec le courant de façon linéaire.

8. Simulation de consommation d'oxygène d'une pile à combustible

Pour simuler la consommation d'oxygène d'un PAC, nous avons utilisé l'équation(I.18).Le résultat est représenté en figure II.28.

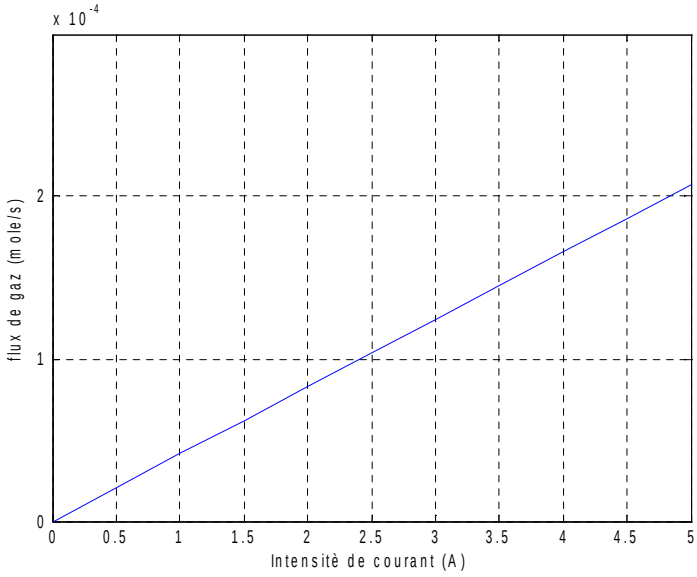


Figure II.28 : Consommation d'oxygène d'une pile à combustible

Nous remarquons que le flux augmente avec le courant de façon linéaire.

9. Simulation de l'entropie de l'eau, hydrogène et oxygène

Les diverses entropies en fonction de la température sont représentées ci-dessous.

.

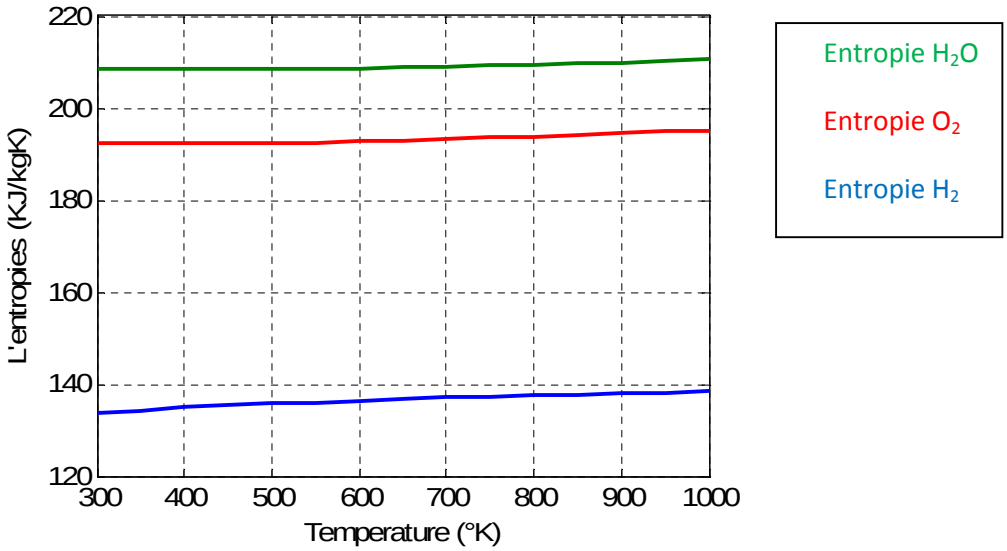


Figure II.29 : Entropies d'hydrogène, d'oxygène et de l'eau en fonction de la température.

Nous remarquons que ces entropies augmentent avec la température.

10. Simulation de la tension de Nernst en fonction de la température

A présent, on s'intéresse à étudier l'effet de la température sur la variation de la tension de Nernst.

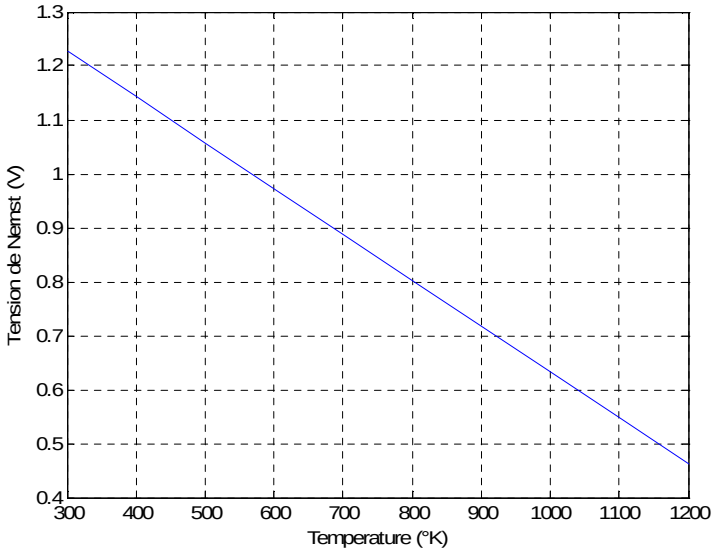


Figure II.30 : Tension de Nernst en fonction de la température

La tension de Nernst diminue selon l'augmentation de la température.

11. Simulation des Pertes d'activation en fonction de la température

Nous étudions l'influence de la température sur les pertes d'activation. Ceci est montré en figure II.31.

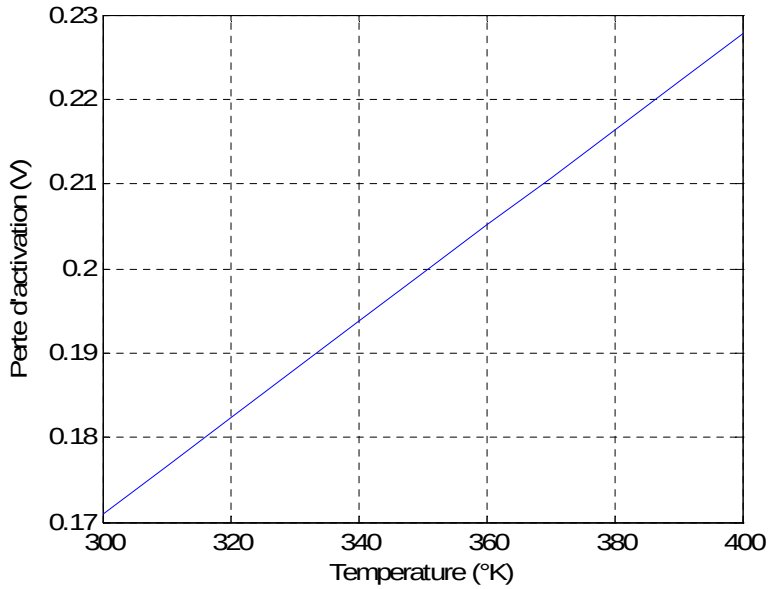


Figure II.31 : Pertes d'activation en fonction de la température

La variation des pertes d'activation selon la température est linéaire.

12 .Simulation des pertes d'activation en fonction de la densité de courant

Nous nous intéressons à la variation des pertes d'activation vis-à-vis de la densité de courant .

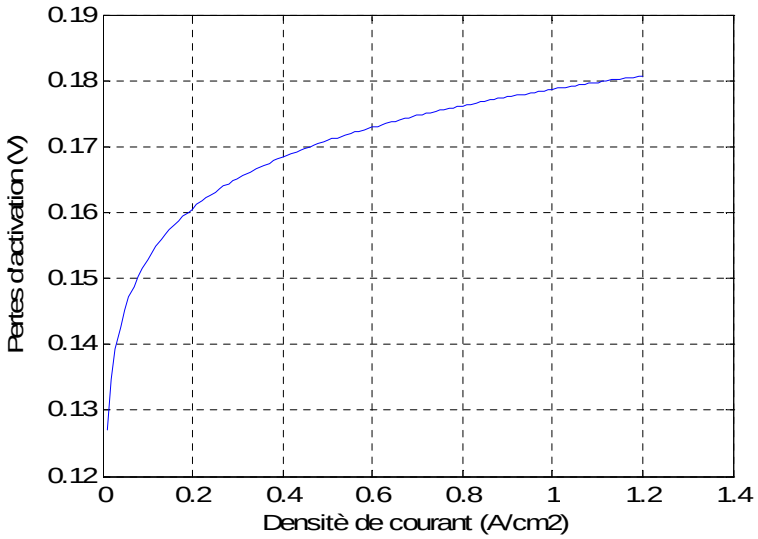


Figure II.32 : Pertes d'activation en fonction de la densité de courant

La variation des pertes d'activation selon la densité de courant n'est pas linéaire comme le montre la figure .Une augmentation de la densité de courant entraine une augmentation des pertes d'activation.

13.Simulation des pertes ohmiques en fonction de la densité de courant

La variation des pertes ohmiques selon la densité de courant est représentée en figure (II.33)

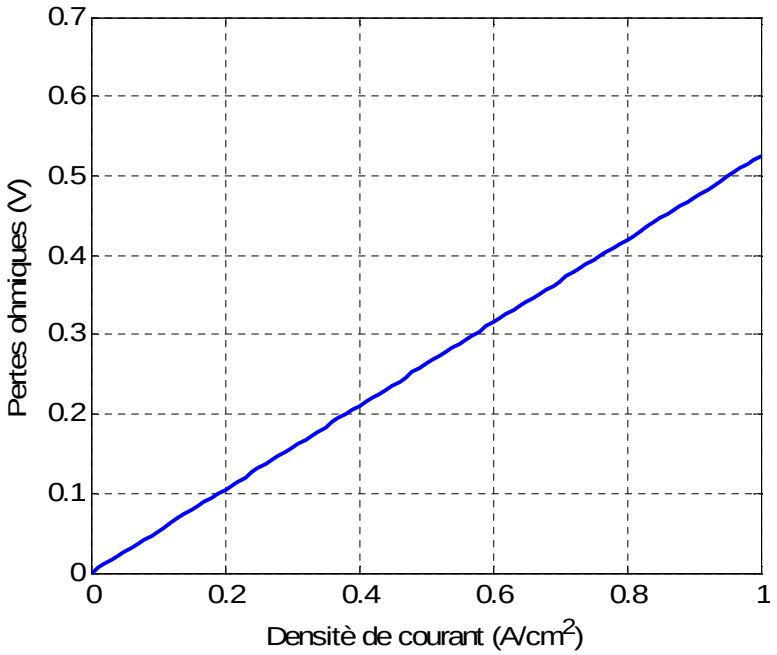


Figure II.33 : Pertes ohmiques en fonction de la densité de courant

La variation des pertes ohmiques en fonction de la densité de courant est linéaire. L'augmentation de la température entraine une augmentation de ces pertes.

14. Simulation des pertes ohmiques en fonction de la section de la pile

Les pertes ohmiques ont une relation avec la section de la PAC. La variation est illustrée par la figure(II.34) .

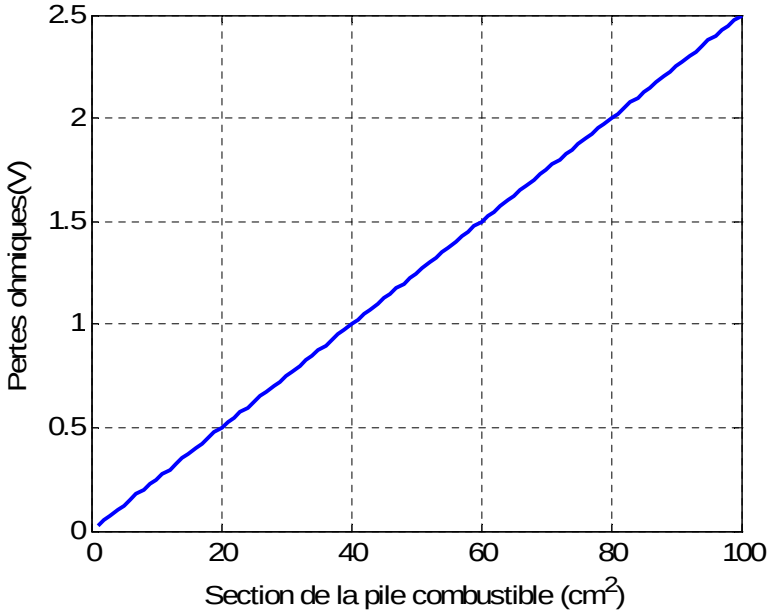


Figure II.34 : Pertes ohmiques en fonction de la section de la pile

Elle est linéaire plus la section croit, plus cette perte augmente.

15. Conclusion

Nous avons présenté, dans ce chapitre, les divers résultats des simulations des caractéristiques électriques en régime stationnaire des différents types de piles AvistaSR12,BallardV et BCS500W.

Nous avons appliqué le modèle d'Amphlett pour ces piles et étudié l'influence des agents (température, pression…) sur les caractéristiques électriques.

On s'est intéressé à voir l'impact d'autre facteurs sur la PEMFC(ξ1, ξ2,..) d'après les résultats , les paramètres de notre modèle sont classés comme suit : :insensibles(A,L,Rc),sensibles(B, ξ4),très sensibles(imax,ξ1 et ξ3).

La modélisation thermodynamique a été entrevue ainsi que les différentes pertes en tension.

Les générateurs (PACs), ont des performances qui sont fortement tributaires des conditions de fonctionnement liées à leur environnement. la tempèrature et la pression sont deux paramètres clès dans le fonctionnement d'une pile à combustible. Leur augmentation augmente les performances de la pile.

Bibliographie

[1] Bouchra Wahdame, «Analyse et optimisation du fonctionnement de piles à combustible par la méthode des plans d'expériences», thèse de doctorat, université de technologie de belfort montbeliard et universitè de franchè-comte, Année 2006.

[2] J. Kim & al. & C.E. Chamberlin, «Modeling of proton exchange fuel cell membrane with an empirical equation», Journal of Electrochemical Society, Vol. 142, N°8, pp. 2670-2674, 1995.

[3] Séverine Busquet, «Etude d'un système autonome de production d'énergie couplant un champ potovoltaique, un électrolyseur et une pile a combustible : réalisation d'un band d'essai et modélisation», thèse de doctorat, école des mines de Paris,2003.

[4] J.C. Amphlett, R.M. Baumert, R.F Mann, B.A. Peppley, P.R. Roberge and T.J. Harris,«Performance Modelling of the Ballard Mark IV Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell I,Mechanistic Model Development», Journal of the Electrochemical Society, Vol. 142,N°8, 1995.

[5] M.W Fowler, R.F. Mann, J.C Amphlett, B.A. Peppley and P.R. Roberge, «Incorporation of Voltage Degradation into a Generalised Steady State Electrochemical Model for a PEM Fuel Cell», Journal of Power Sources, Vol. 106, pp. 274 - 283, 2002.

[6] J.M. Corrêa, F.A. Farret and L.N. Canna, «An Analysis of the Dynamic Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cells Using an Electromechanical Model», in Proc. IEEE IECON'01, pp. 141 – 146, 2001.

[7] F. Amrouche, «Caractérisation Expérimentale d'un Assemblage -Stacks- de Piles à Combustible à Membrane Echangeuse de Protons», Mémoire de PFE, USTHB, Novembre 2004.

[8] R.F. Mann, J.C. Amphlett, M.A.I. Hooper, H.M. Jensen, B.A. Peppley and P.R. Roberge, «Development and Application of a Generalised Steady-State Electrochemical Model for a PEM Fuel Cell»,Journal of Power Sources, Vol. 86, pp. 173 - 180, 2000.

[9] A.R. Maher and S. Al-Baghdadi, «Modelling of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance Based on Semi-Empirical Equations», Renewable Energy, Vol. 30, pp. 1587 - 1599, 2005.

[10] National Energy Technology Laboratory, «Fuel Cell Handbook», 6th Ed., pp. 2 – 9, 2002.

[11] H. Wendt et G. Kreysa, «Génie Electrochimique : Principes et Procédés», Ed. Dunod, p.372, Paris, 2001.

[12] C.N. Maxoulis, D.N. Tsinoglou, G.C. Koltsakis, «Modelling of Automotive Fuel Cell Operation in

Driving Cycles», Energy Conversion and Management, Vol. 45, pp. 559 –573, 2004.

[13] O. Morisot, 'Evaluation et Analyse Technico-Economique des Systèmes Piles à Combustible - Hiérarchisation des Verrous sur la Voie des Applications Stationnaires', Rapport final de l'étude EASYPAC, Août 2001.

[14] Y. Wang and C-Y. Wang, «Transient Analysis of Polymer Electrolyte Fuel Cells», Electrochimica Acta, Vol. 50, pp. 1307 – 1315, 2005.

[15] J.C. AMPHLETT et al, «Performance modeling of the Ballard Mark IV Solid PolymerElectrolyte Fuel Cell», J. Electrochem. Soc, vol. 142. n°1, 1995.

[16] J.C. Amphlett, R.M. Baumert, R.F Mann, B.A. Peppley, P.R. Roberge and T.J. Harris, «Performance Modelling of the Ballard Mark IV Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell II,Empirical Model Development», Journal of the Electrochemical Society, Vol. 142, N°9-5,1995.

[17] J.C. Amphlett, R.M. Baumert, R.F. Mann, B.A. Peppley, P.R. Roberge and A.Rodrigues, Parametric Modelling of the Performance of a 5 kW Proton-Exchange Membrane Fuel Cell Stack», Journal of Power Sources, Vol. 49, pp. 349 - 356, 1994.

[18] D. Chu and R. Jiang, «Performance of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) Stacks - Part I, Evaluation and Simulation of an Air Breathing PEMFC Stack», Journal of Power Sources, Vol. 83, pp. 128 - 133, 1999.

[19] D. Yu and S. Yuvarajan, «Electronic Circuit Model for Proton Exchange Membrane Fuel Cells», Journal of Power Sources, Vol. 142, Issue: 1-2, pp. 238 – 242, March 24, 2005.

[20] T. Okada and G. Xie, «Simulation for Water Management in Membranes for Polymer Electrolyte Fuel Cells», MEEG, Electrochimica Acta., Vol. 43, N°14-15, pp. 2141 -2155, 1998.

[21] J.M. Corrêa, F.A. Farret, M. Godoy Simes and V.A. Popov,«Sensitivity Analysis of the Modelling Parameters Used in Simulation of Proton Exchange Membrane Fuel Cells», Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), -Accepted for Publication- 2004.

[22] J.M. Corrêa, F.A. Farret, J.R. Gomes and M. Godoy Simes, «Simulation of Fuel-Cell Stacks Using a Computer - Controlled Power Rectifier with the Purposes of Actual High- Power Injection Applications», IEE Transactions on Industry Applications, Vol. 39, N°4, July/August 2003.

[23] J.C. Amphlett, R.F. Mann, B.A. Peppley, P.R. Roberge and A. Rodrigues, «A Model Predicting Transient Responses of Proton Exchange Membrane Fuel Cells», Journal of Power Sources, Vol. 61, pp. 183 - 188, 1996.

[24] Jeferson M. Corrêa, Felix A. Farret, Luciane N. Canha, Marcelo G Simões, «An Electrochemical-Based Fuel Cell Model Suitable for Electrical Engineering Automation Approach», IEEE Trans. on Industrial Electronics,vol. 51, n° 5, 1103 -1112, octobre 2004.

Chapitre III

Couplage direct Pile à combustible - Charge

1. Introduction

Un modèle de la pile à combustible (PAC) permet de satisfaire la prédiction du comportement de la pile en fonction de ses conditions de fonctionnement. Les générateurs (PAC) ont des performances qui sont fortement tributaires des conditions de fonctionnement liées à leur environnement. En couplage direct PAC-Charge, le point de fonctionnement est déterminé en prenant l'intersection de la caractéristique électrique courant-tension I-V de la PAC avec celle de la charge. Ce point de fonctionnement varie du fait que la source d'énergie ou la charge peut varier à tout moment. C'est pourquoi, souvent, on n'opère pas au maximum de puissance du stack PAC, et la puissance fournie à la charge est inférieure à la puissance maximale.

Dans cette présente étude, nous nous intéressons à l'étude du couplage direct PAC-Charge.Cette étude peut donc nous renseigner si nous devons adopter cette connexion directe ou pas selon la charge à approvisionner par PAC.

2. Principe

La connexion directe d'une pile à combustible à une charge reste actuellement le principe de fonctionnement le plus économique et le plus répandu vu sa simplicité. Il faut s'assurer auparavant que la charge accepte bien la connexion directe au générateur (type continu). En effet, la pile à combustible est une source d'énergie continue qui ne peut être connectée à une charge alternative que via un étage d'adaptation de type onduleur.

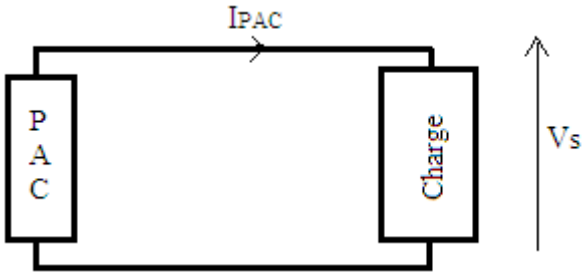


Figure III.1 : Connexion directe pac-charge.

L'inconvénient majeur de cette connexion est sa dépendance directe entre la puissance fournie par le générateur et la charge. La puissance transmise directement à la charge n'est pas toujours effectuée à la puissance maximale Popt que peut fournir la PAC.

Les points de fonctionnement sont dominés par plusieurs facteurs tels que : la charge, les conditions de travail (température, pression…) et par la configuration du stack de PACs (groupement série, parallèle ou mixte)[1].

3. Etude d'un exemple

Dans cette étude, nous avons pris la pile avista-Sr12 avec les mêmes paramètres du tableau II.2 du chapitre 2, couplée à une charge purement résistive de valeur à titre illustratif Rcharge=60Ω, le nombre total des cellules PAC est n_c=30.

Les points de fonctionnement courant-tension (Ifct,Vfct) résultent de l'intersection entre la courbe caractéristique électrique de la PAC et celle de la charge pour des conditions de travail données. Ceci est obtenu par la résolution de l'équation d'égalité entre III.1,III.3et III.4.

La tension de fonctionnement Vfct est obtenue en remplaçant les valeurs de Ifct dans l'équation III.2.

Donc, pour la même charge, nous obtenons pour chaque variation de la température et chaque variation de la pression, un couple (Ifct,Vfct).

$$
\begin{aligned}
V_{PAC} = {} & 0.2817 - 0.85\,10^{-3}(T - 298.15) \\
& + 4.308\,10^{-5}T\left[ln\left(\frac{3}{4}P_{anode}\right) + \frac{1}{2}ln\left(\frac{1}{2}\quad P_{cath}\right)\right] \\
& + \left[2.86\,10^{-3} + 210^{-4}\,ln(A) + 4.3\,10^{-5}ln\left(\frac{\frac{3}{4}P_{anode}}{1.0910^{6}exp\left(\frac{77}{T}\right)}\right)\right]\cdot T \\
& + \quad 7.610^{-5}Tln\left(\frac{\frac{1}{2}\cdot P_{cath}}{5.0810^{6}\cdot e^{-\left(\frac{498}{T}\right)}}\right) - 1.93\,10^{-4}Tln(i_{PAC}) \\
& - i_{PAC}\left[\frac{\left[1 + 0.03\left(\frac{i_{PAC}}{A}\right) + 0.062\left(\frac{T}{303}\right)^{2}\left(\frac{i_{PAC}}{A}\right)^{2.5}\right]}{\left[\lambda_{H_2O/SO_3^-} - 0.0634 - 3\left(\frac{i_{PAC}}{A}\right)\right]\cdot exp\left[4.18\left(\frac{T-303}{T}\right)\right]} + R_C\right] \\
& + B\left(1 - \frac{J}{J_{max}}\right). \qquad \text{III. 1}
\end{aligned}
$$

$V_s=n_c*V_{PAC}.=30*V_{PAC}.$ III.2

$V_{charge}=R_{charge}*i_{PAC}.$ III.3

$V_s=V_{charge}.$ III.4

Comme la caractéristique électrique de la PAC est fonction de T et de Po2 , dans notre présente étude, nous maintenons un facteur constant et on fait varier l'autre.

En premier lieu, nous avons maintenu la pression à 1atm et nous avons fait varier la température de 0 à 100°C avec un pas de 10°C. Nous connectons en couplage direct notre

stack à la charge prise et calculons à chaque variation de T, les différents points de fonctionnement. Les résultats obtenus sont avancés dans les figures qui suivent.

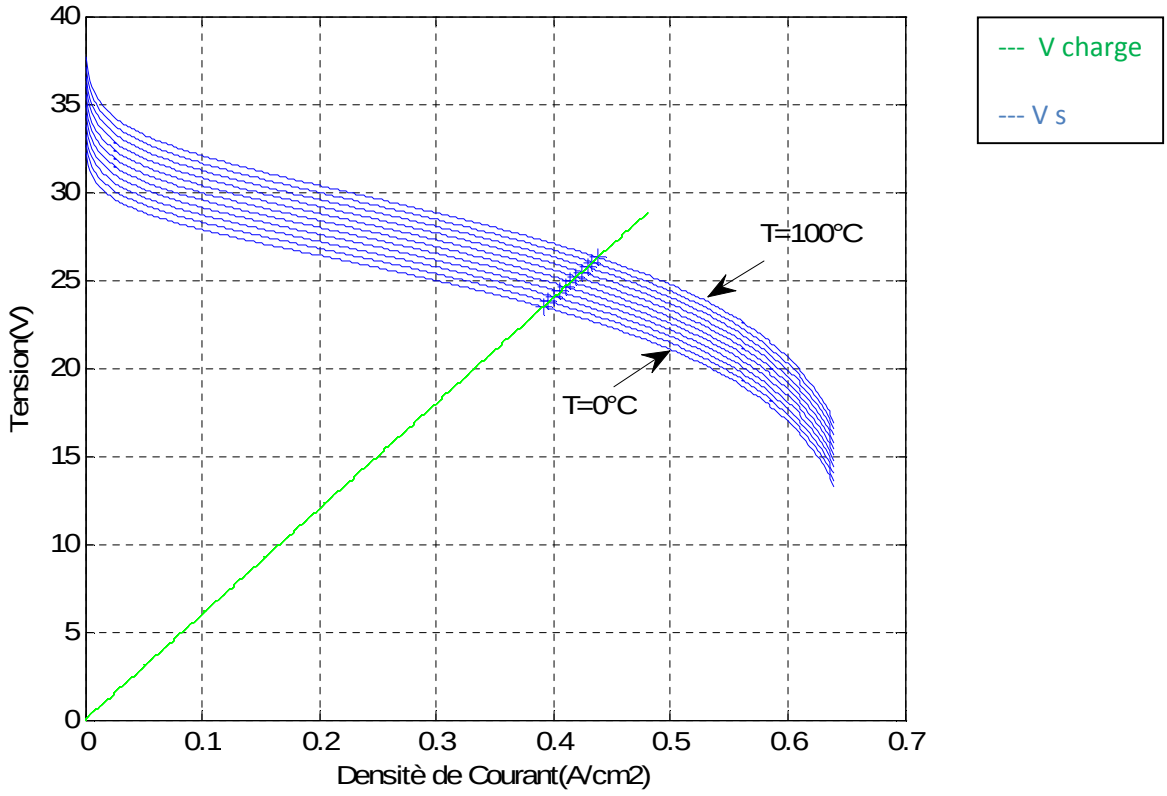


Figure III.2 : Caractéristique tension-densité de courant pour différentes températures pour la charge R.

Le point de fonctionnement à T = 50°C par exemple est Ifct = 0.41 A/cm^2 etVfct= 24.88V qui donne une densité de puissance de fonctionnement de 10.32 W/cm^2 alors que la densité de puissance optimale est de 11.68 W/cm^2.Ce point de fonctionnement varie selon la variation de la température.

La courbe de variation des diverses densités de puissance obtenues est donnée par la figure (III.3).

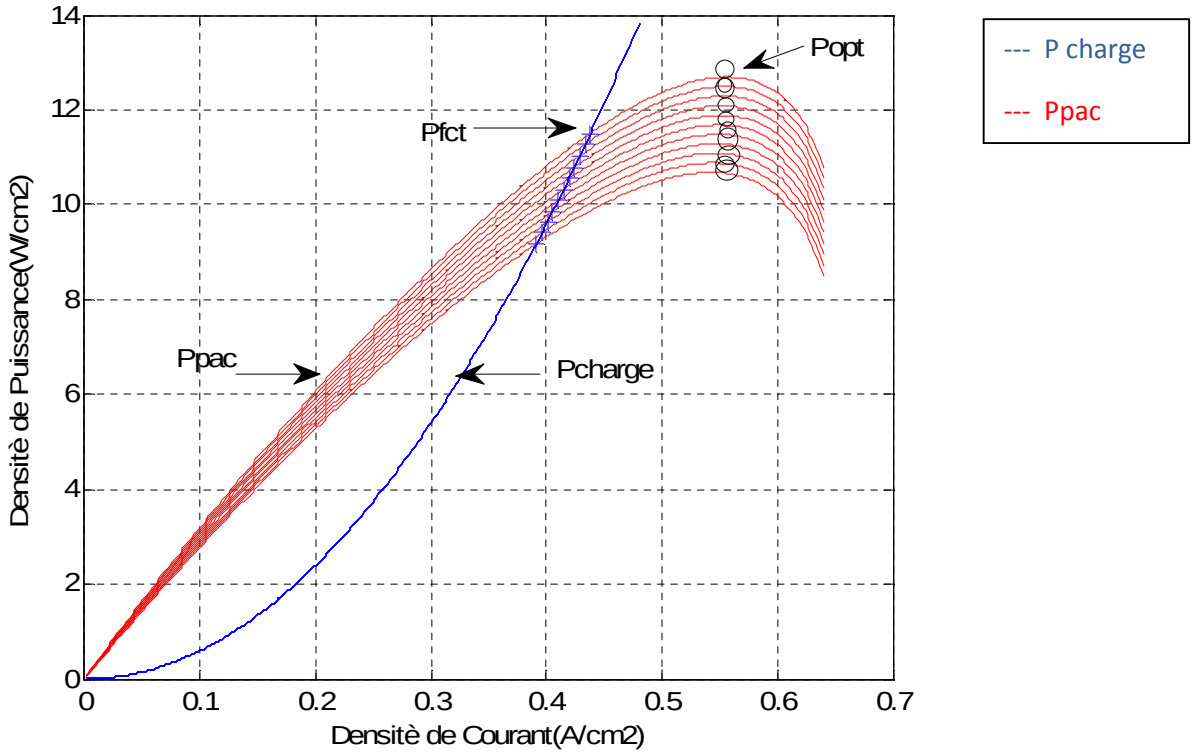


Figure III.3 : Représentation des densités de puissance en fonction de la densité de courant pour la charge1 pour différentes températures.

-Pfct :est la densité de puissance de fonctionnement déjà prédéfinie comme étant le produit de la densité de courant de fonctionnement Jfct et la tension de fonctionnement Vfct.

-Popt : est la densité de puissance maximale fournie par le stack.

Ces deux densités de puissance sont calculées pour des conditions de travail maintenues constants étant données une charge et une configuration du stack de PACs .

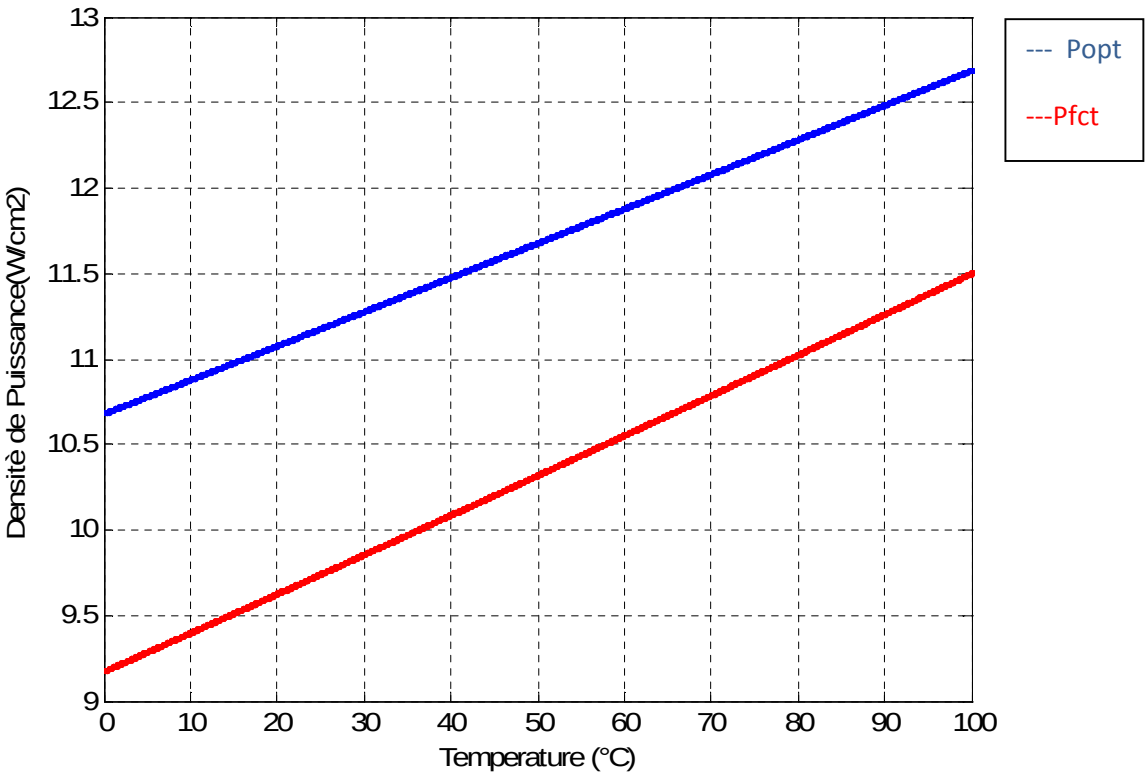


Figure III.4 : Différentes densités de puissance obtenues pour la charge R en fonction de la température.

La figure (III.4) montre la variation des divers points de fonctionnement et ceux de densités de puissance optimales vis-à-vis de T pour Po2 constante. A titre d'exemple pour T= 60°C, Popt = 11.9 W/cm^2 et Pfct =10.58 W/cm^2 engendrant un écart de densité de puissance de 1.32 W/cm^2 dans ce cas .

Pour mesurer la qualité d'adaptation entre la PAC et la charge, nous avons introduit le rendement d'utilisation qui est le rapport entre la densité de puissance de fonctionnement et la densité de puissance optimale. Il est calculé à chaque changement de conditions de travail et à chaque variation de charge.

$$\eta util = Pfct/Popt. \qquad III.5$$

Pour notre exemple, nous calculons ce rendement, pour notre charge, qui variera dans ce cas selon T pour une P_{o2} constante.

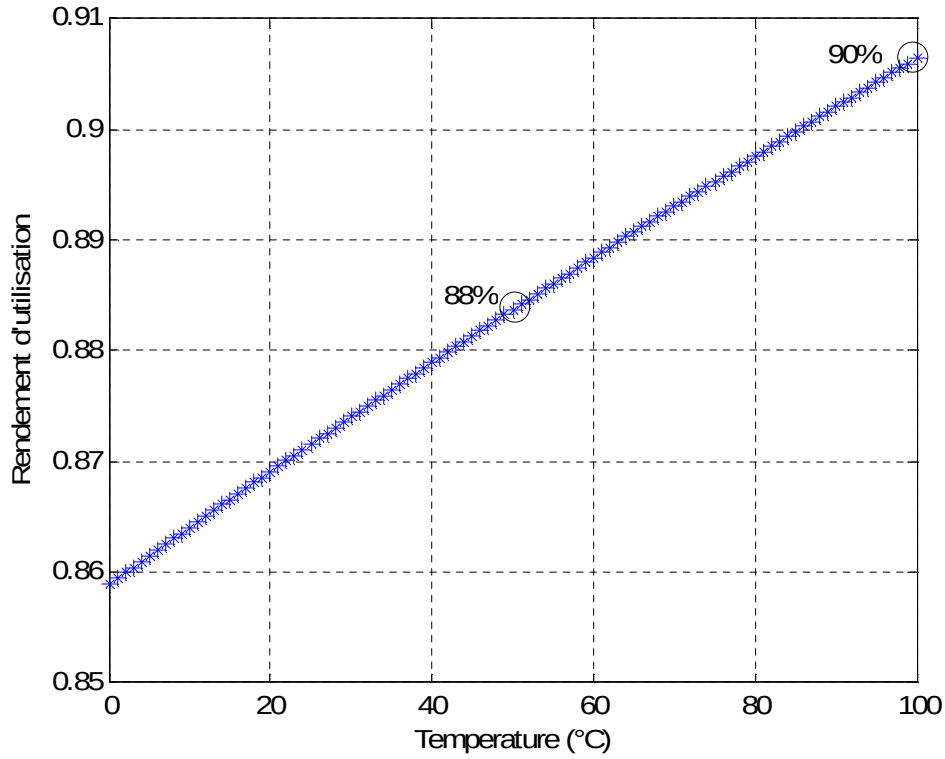


Figure III.5 : Variation du rendement selon la température pour la charge R pour P_{o2}=1atm.

Pour notre charge, ce rendement à T= 50°C par exemple et Po2= 1atm est de 88%. Il est minimal à 0°C et à tendance à croitre pour atteindre une valeur crête de 90% à T=100°C .Ceci implique que notre charge s'approche de celle optimale pour ces dernières conditions.

La variation du rendement d'utilisation selon la température implique l'introduction du rendement moyen qui est défini comme

$$\eta utilmoy = \frac{1}{Tmax - Tmin}\int_{Tmin}^{Tmax} \eta util(T)dT \qquad \text{III. 6}$$

Pour ce cas, avec ces conditions de travail, nous avons obtenu :ηutilmoy =88% .

Puisque la pression a un impact sur la caractéristique électrique de la PAC, en deuxième lieu, nous avons refait le même travail mais avec une température maintenue à 40 °C comme exemple et nous avons fait varier la pression de 1 à10 atm avec un pas de 1atm.

Les résultats sont avancés dans les figures qui suivent. En figure (III.6), nous avons représenté la caractéristique tension-densité de courant pour différentes pressions.

Nous avons trouvé par exemple :

Pour Po2=5atm ,Jfct=0.41 A/cm^2 ,Vfct =24.96V .

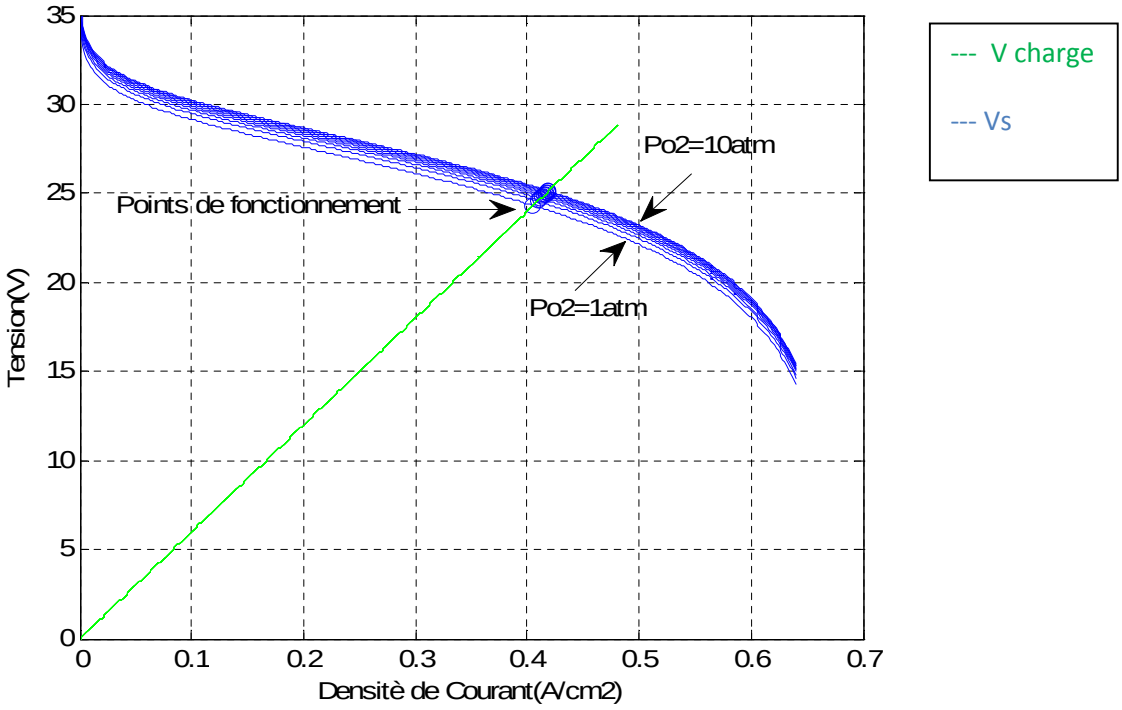


Figure III.6.a : Variations V-J pour diverses pressions à T=40°C pour la charge R et le stack.

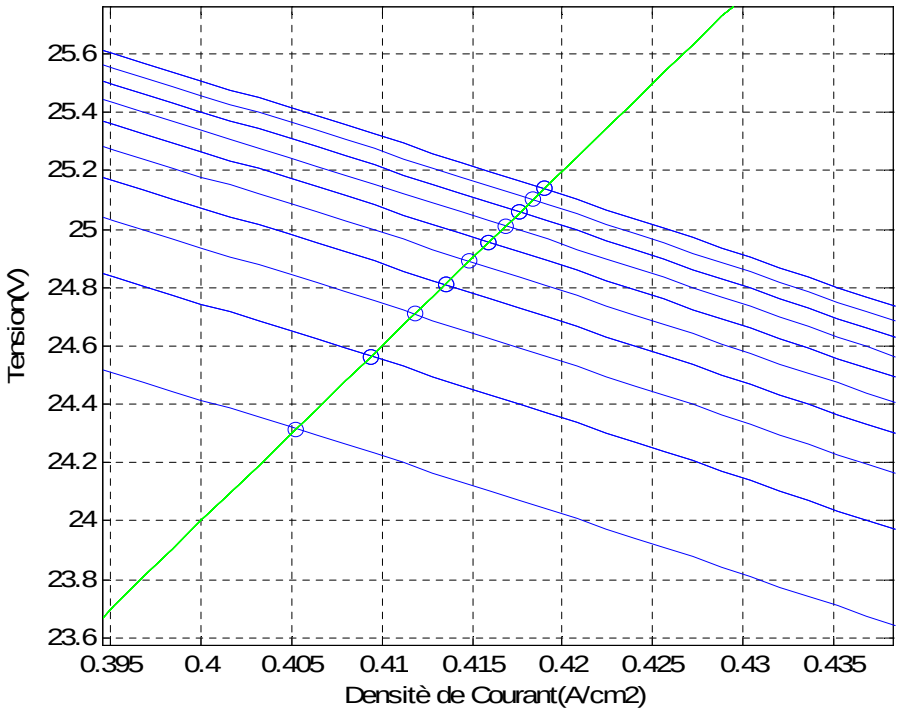


Figure III.6.b : Variations V-J pour diverses pressions à T=40°C pour la charge R et le stack zoomée.

Nous remarquons que le point de fonctionnement est dépendant de la pression.

La figure (III.7) reprend les résultats obtenus pour les différentes densités de puissance. Par exemple, pour Po2=2atm Popt= 11.45W/cm^2 et Pfct =10.06 W/cm^2 , l'écart résultant est de 1.39 W/cm^2 dans ce cas .

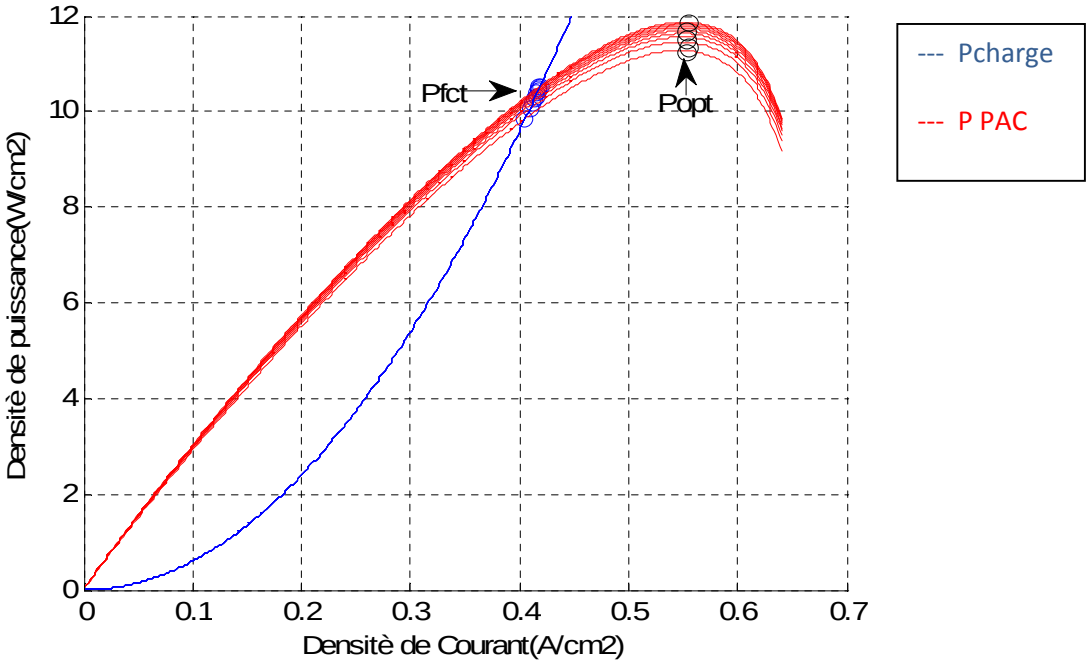


Figure III.7.a: Variations P-J pour diverses pressions à T=40°C pour la charge R et le stack.

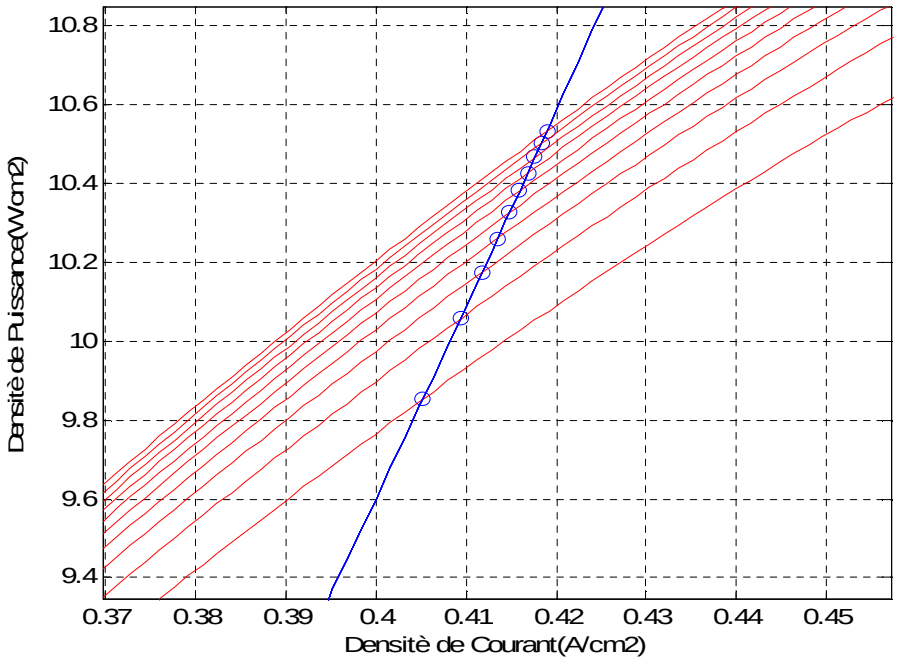


Figure III.7.b : Variations P-J pour diverses pressions à T=40°C pour la charge R et le stack zoomée.

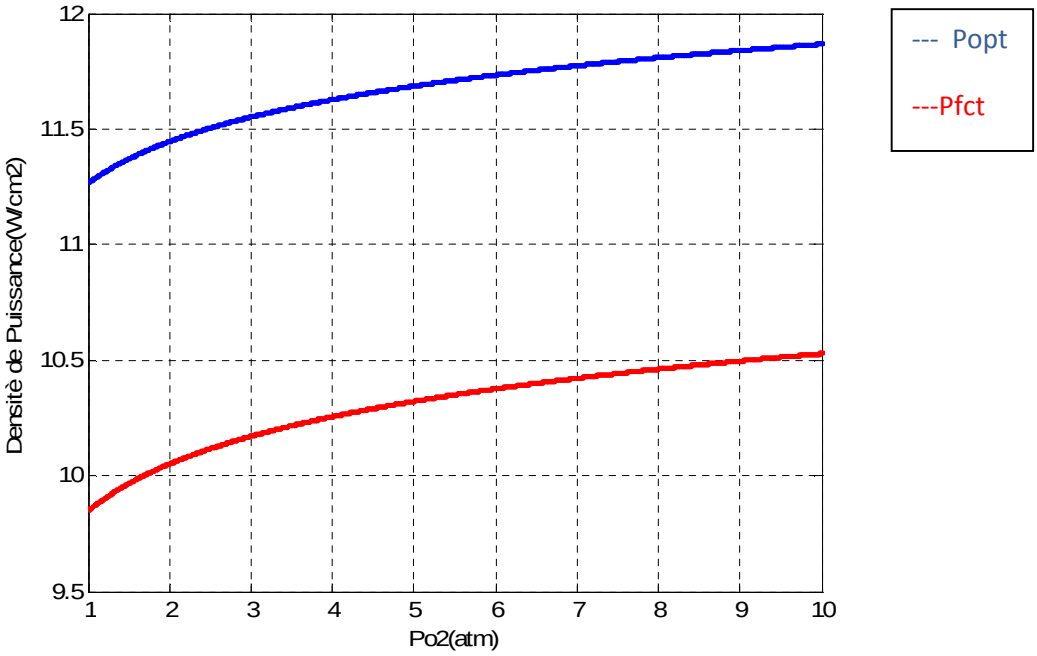


Figure III.8: différentes densités de puissance obtenues pour la charge R et le stack en fonction de la pression.

En figure (III.8), nous avons représenté la variation de Pfct et Popt selon la variation de P_{O2}. L'écart maximal est de 1.34 W/cm^2 à P_{O2}=10atm dans cet exemple.

En figure (III.9), nous avons calculé et représenté la variation du rendement d'utilisation selon P_{O2} cette fois ci .

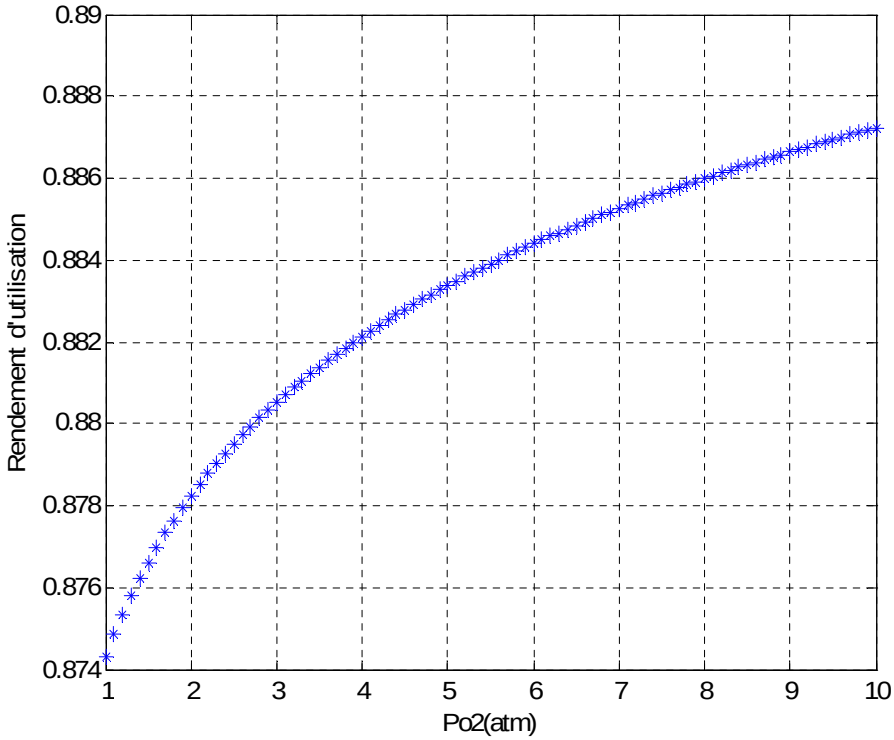


Figure III.9 : variation du rendement selon la pression pour la charge R.

Nous remarquons selon la figure(III.9) que le rendement croît d'une valeur minimale à une valeur maximale de 88.7% à P_{O2}=10atm.

Le rendement d'utilisation moyen selon P_{O2} cette fois ci est formulé selon :

$$\eta utilmoy = \frac{1}{Po2max - Po2min}\int_{Po2min}^{Po2max} \eta util(Po2)dPo2 \qquad \text{III. 7}$$

Après les calculs, nous avons obtenu :

:ηutilmoy =88%

D'après ces résultats, nous remarquons que le rendement d'utilisation moyen est de l'ordre de 88% et que la connexion directe pour cette charge est acceptable révélant de la sorte une bonne connexion entre les éléments. L'étude s'est faite selon la variation de T et de P_{O2}, les résultats obtenus sont satisfaisants. Notre charge utilise donc, de façon acceptable le stack PAC. Elle présente implicitement un bon rendement moyen en connexion directe avec le stack.

Toutefois, ce type de couplage n'est pas rentable tout le temps comme on le verra ci après dans un autre exemple.

4. Etude d'un autre exemple

La même étude est reprise avec les mêmes paramètres du stack du premier exemple mais cette fois ci on a changé la valeur de la résistance Rcharge=R'=160 Ω.

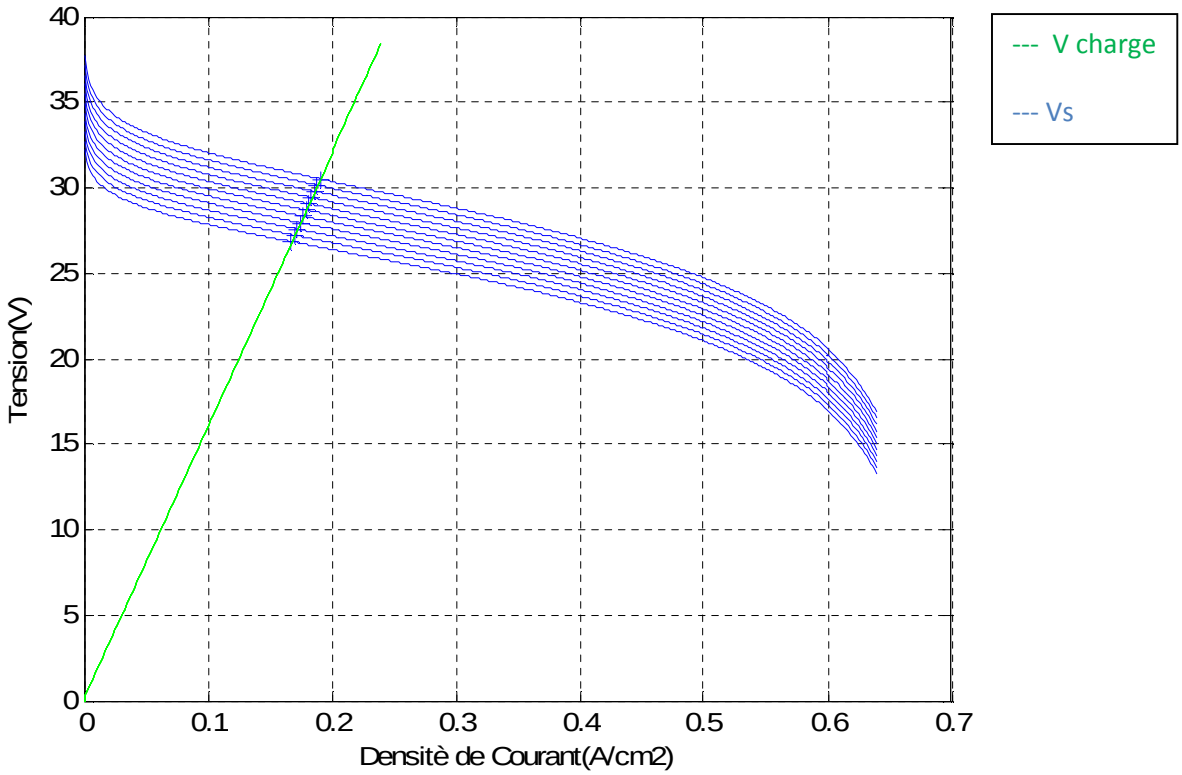


Figure III.10 : Caractéristique tension-densité de courant pour différentes températures pour la chargeR' et le stack.

La courbe III.10 reprend les caractéristiques V-J obtenues pour la nouvelle charge.

A T = 40°C, les points de fonctionnement sont Jfct = 0.1724 A/cm^2 etVfct= 27.57 V qui correspond à une densité de puissance de fonctionnement de 5W/cm^2 et une densité de puissance optimale de 11.5W/cm^2. L'écart résultant est de 6.5 W/cm^2.

En figure III.11 est représentée la caractéristique densité de puissance de fonctionnement et celle optimale vis-à-vis de la densité de courant pour T variable et P_{o2}=1atm.

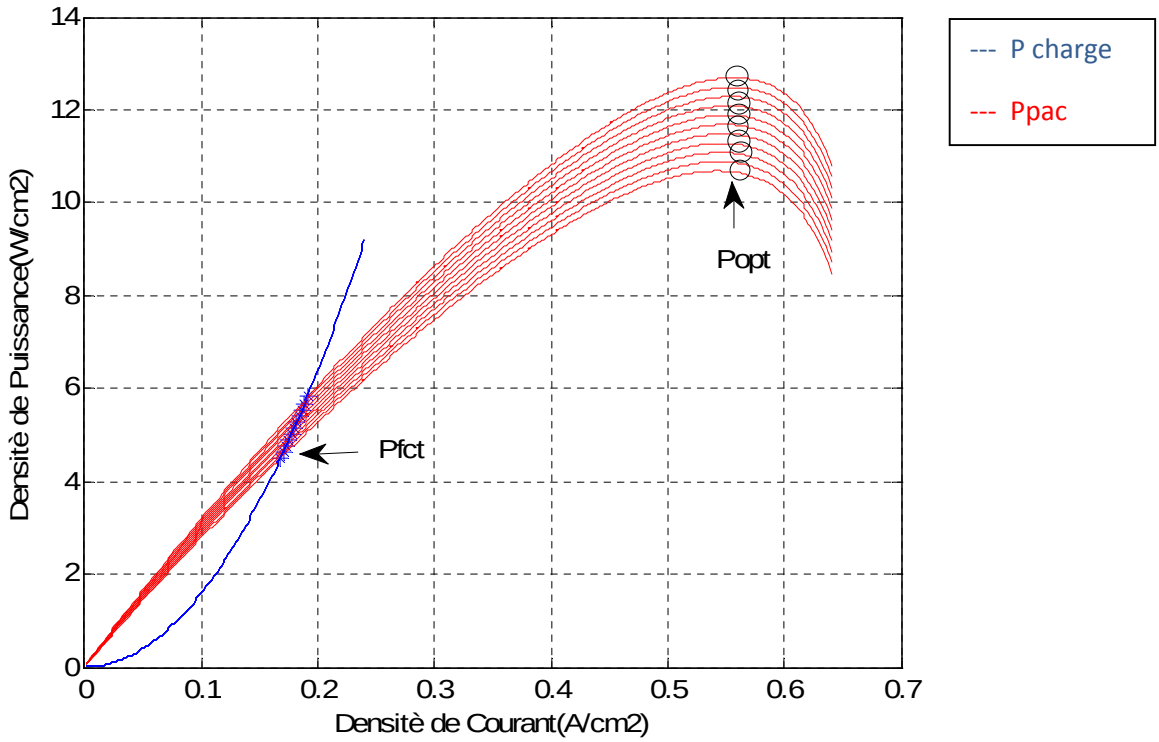


Figure III.11 : Caractéristiques des densités de puissance en fonction de la densité de courant pour la chargeR' et le stack pour différentes températures à Po2=1atm.

On voit d'après ces résultats que la caractéristique des densités de puissance de fonctionnement s'éloigne de celle des densités de puissance optimales.

En figure III-12, nous avons représenté la variation de Popt et Pfct vis à vis de T.

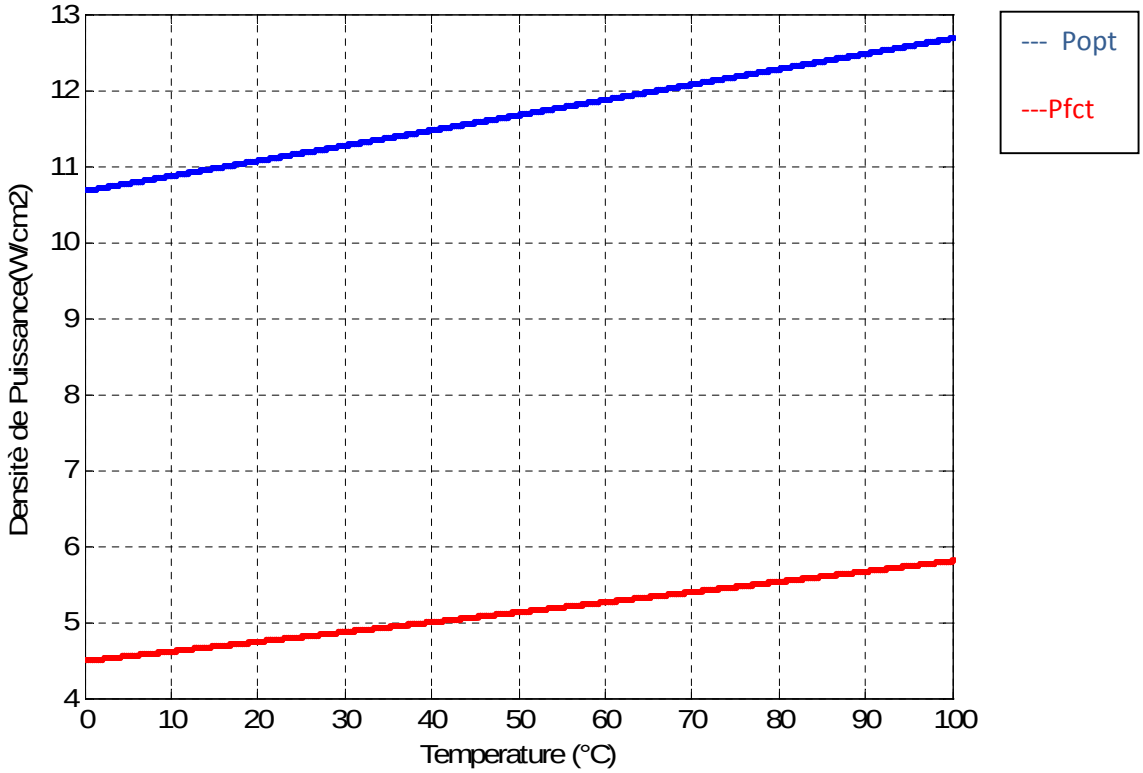


Figure III.12 : Différentes densités de puissance obtenues pour la chargeR' et le stack en fonction de la température.

Nous remarquons que pour une température donnée, il existe un écart en par exemple entre Popt et Pfct. Par exemple à T=100°C ,Popt=12,69W/cm^2,Pfct=5.81W/cm^2.L'écart est de 6.88 W/cm^2.

Le rendement d'utilisation est un facteur important sur la qualité de cette connexion, nous l'avons tracé pour cet exemple vis-à-vis de la température.

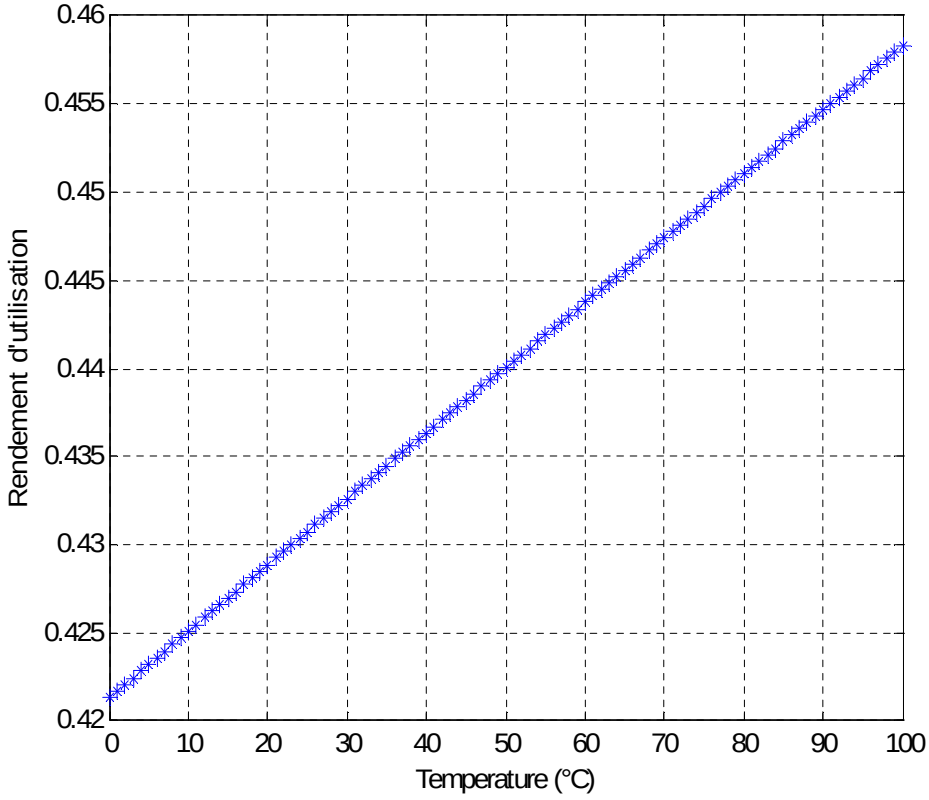


Figure III.13 : Variation du rendement selon la température pour la chargeR'.

Pour cette charge, ce rendement à T= 20°C et P_{O2}= 1atm est de 42%. Il est minimal au départ et a tendance à croitre pour atteindre une valeur crête de 45% à T=100°C .Ceci implique que notre charge est très éloignée de la valeur optimale.

En adoptant l'équation (III.6) ,nous calculons le rendement d'utilisation moyen selon la température à P_{o2} =1atm,nous trouvons pour ce cas le ηutilmoy =44%.ce rendement s'annonce insatisfaisant.

Etant donnée que la pression a un impact sur le fonctionnement de la PAC ,nous étudions donc son influence sur le comportement stack-R' à présent .

La figure III-14 montre la variation des caractéristiques V-J obtenus pour cette charge vis-à-vis de la pression.

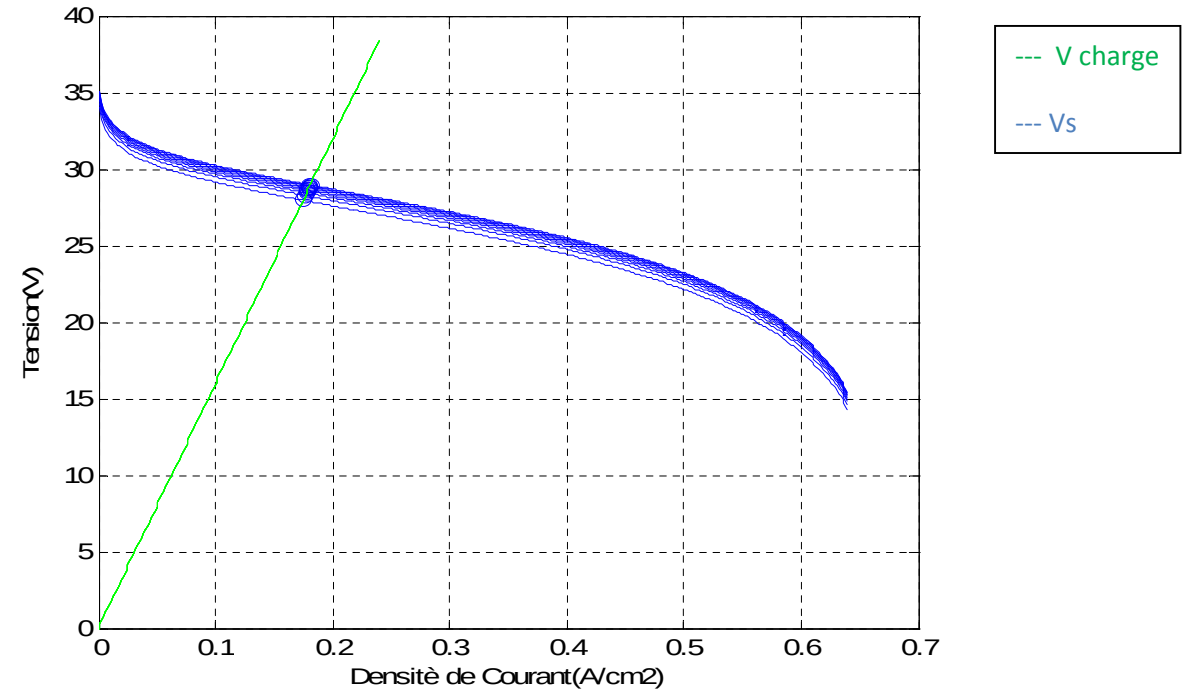


Figure III.14.a : Variations des caractéristiques V-J pour P_{O2} variable à T=40°C pour la chargeR' et le stack.

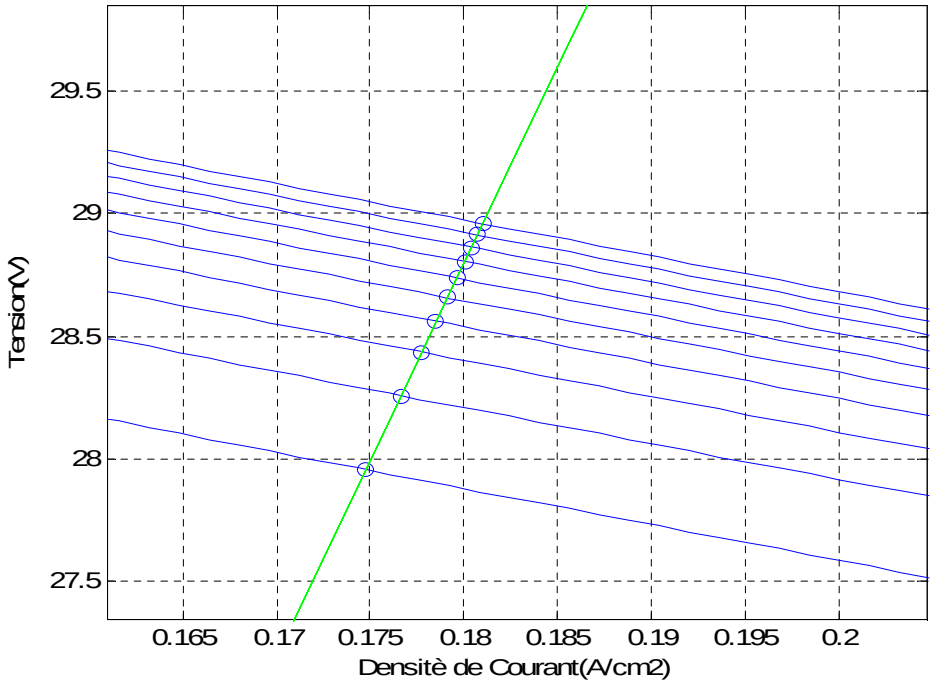


Figure III.14.b : Variations des caractéristiques V-J pour P_{O2} variable à T=40°C pour la chargeR' et le stack zoomée.

A présent, nous nous intéressons à la variation des différentes densités de puissance pour les mêmes conditions du travail en figure III.15.

Pour P_{O2}=2atm et T=40°C nous avons Pfct=10.06 W/cm^2 Popt=11.45W/cm^2 et une différence de densité de puissance de l'ordre de 1.39 W/cm^2 .

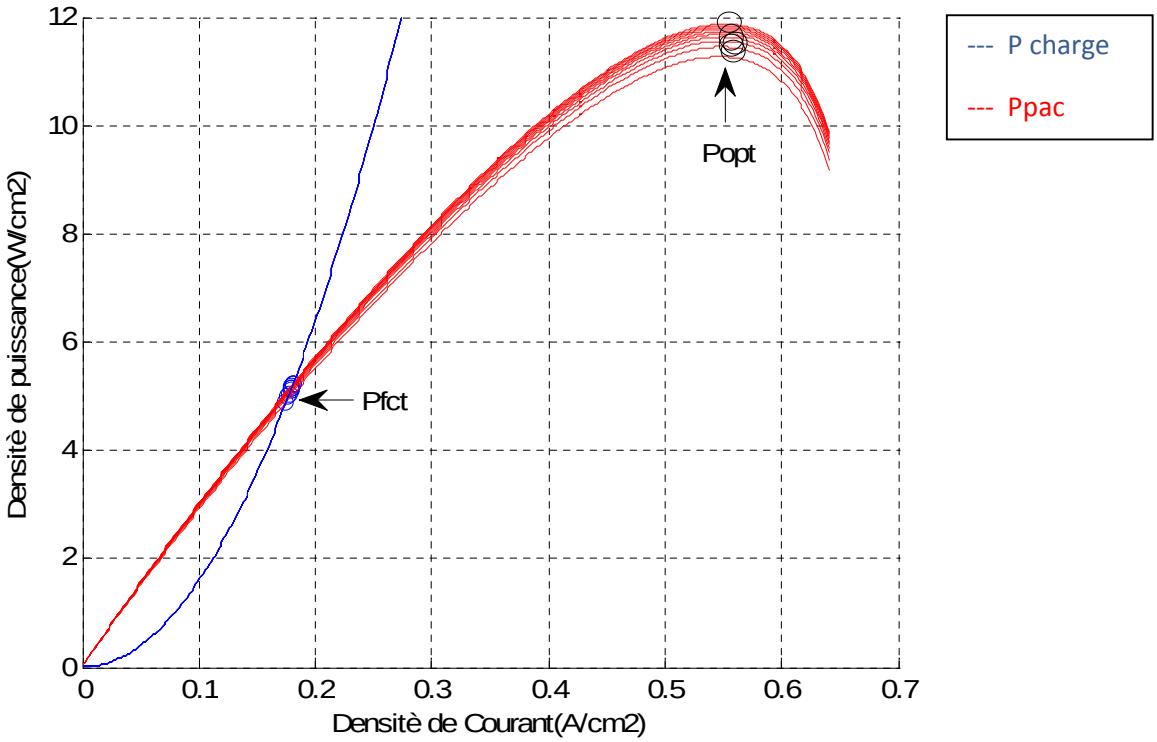


Figure III.15.a : Variations des caractéristiques P-J pour P_{O2} variable à T=40°C pour la charge R' et le stack.

.

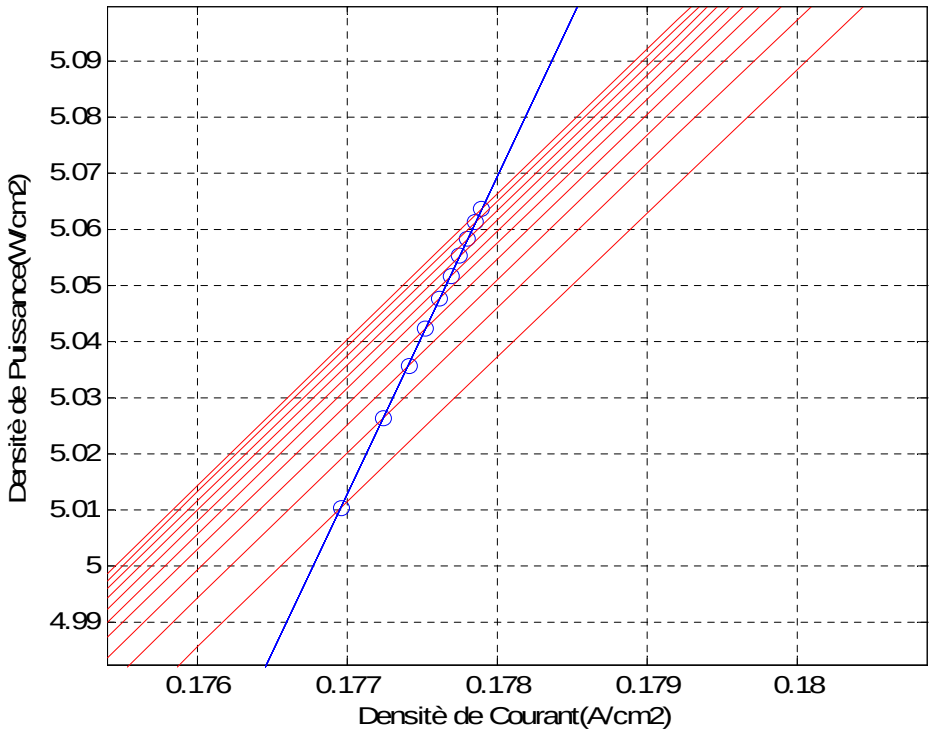


Figure III.15.b : Variations des caractéristiques P-J pour P_{O2} variable à T=40°C pour la charge R' et le stack zoomée.

.

La variation des courbes Popt et Pfct selon P_{o2} est données ci-dessous en figure III-16.

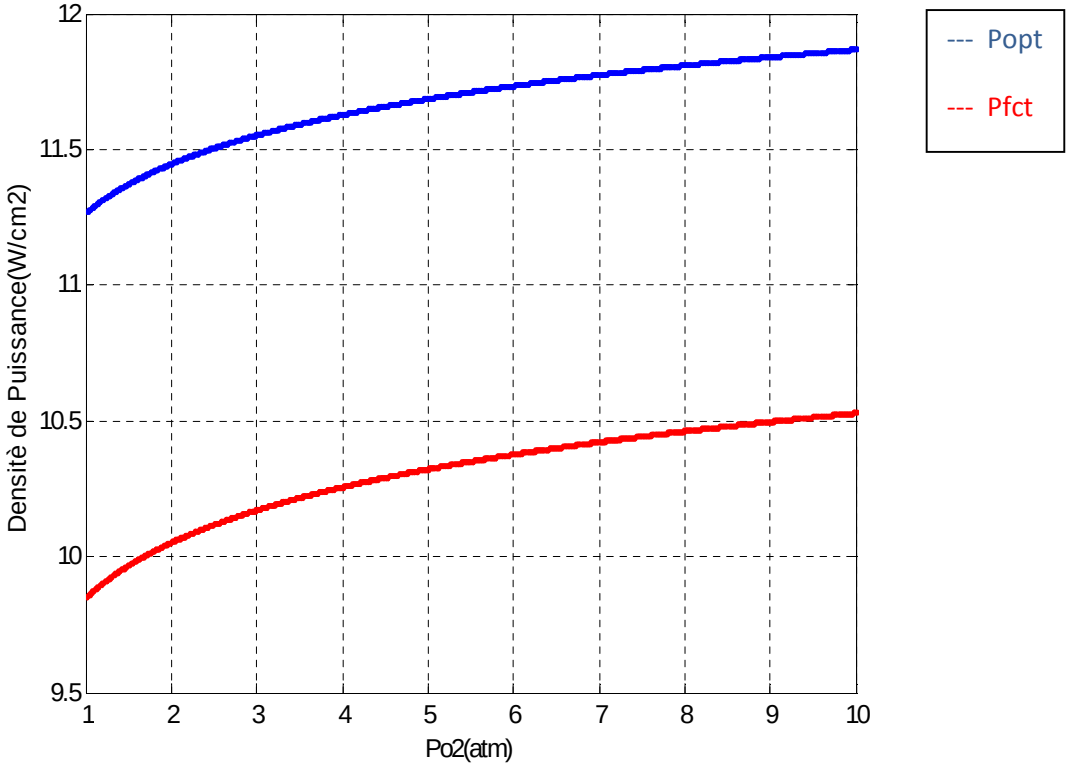


Figure III.16: Différentes densités de puissance obtenues pour la charge R' en fonction de la pression pour T=40°C.

D'après cette figure, nous voyons qu'un écart existe entre ces densités de puissance Pfct et Popt.

Nous remarquons que pour P_{o2}=2atm, la densité de puissance de fonctionnement =10W/cm^2 et la densité de puissance optimale=11.46 w/cm^2.

Puisque le rendement est une grandeur qui nous informe si le stack est bien exploité par la charge ou pas, nous le calculons à chaque changement de P_{o2}.

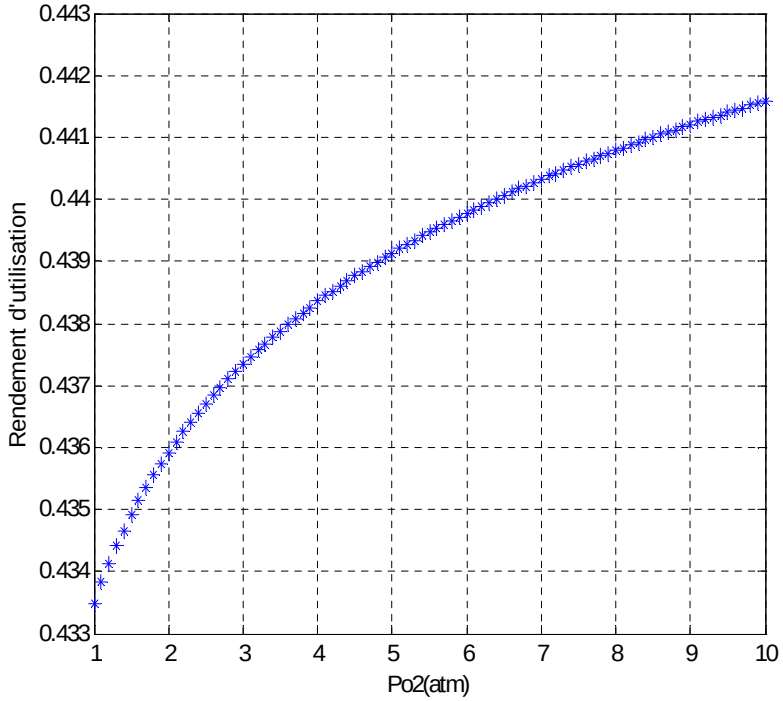


Figure III.17: Variation du rendement selon la pression pour la chargeR'.

La figure III.17 montre les résultats obtenus.

Pour ce cas ,le rendement tend à croitre quand P_{o2} croit mais reste faible(maximum à 44%).Le calcul du rendement moyen selon l'équation (III.7) donne :

ɳutilmoy =43%.

D'après ces résultats obtenus des rendements d'utilisation moyen vis-à-vis de la pression et de température, nous déduisons que la charge R' présente un rendement moyen faible ne dépassant même pas 50%.L'exploitation de la connexion directe est jugée inacceptable pour cette charge à l'inverse de la charge R.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la connexion directe entre une PAC et une charge. La conclusion dégagée est que la qualité de cette connexion est liée aux conditions de travail et à la charge. Ce type de connexion ne s'avère pas toujours rentable.

Malgré la simplicité de cette technique et son faible coût, elle reste toujours limitée car elle n'offre aucun type de réglage. Le transfert de puissance optimale fournie à la charge n'est pas toujours garanti. Toutes les charges ne se plient pas forcément au couplage direct exhibant d'elles même une mauvaise qualité de connexion à l'inverse d'autres charges. De cette façon, le résultat élaboré avantagera l'utilisateur à aiguiller son choix sur le couplage direct s'il fournit un haut degré de rentabilité ou s'il doit l'éluder au cas de son inefficacité.

Bibliographie

[1]Zerhouni Fatima Zohra, «Développement et optimisation d'un générateur énergétique hybride propre à base de PV-PAC» **,** thèse de doctorat,USTOMB,2009.

Chapitre IV

Etude de source commune et sources séparées

1. Introduction

Dans beaucoup de systèmes à base de PACs, le stack est destiné à alimenter une charge unique bien spécifiée. Quand nous disposons de plusieurs charges à approvisionner, la connexion à une même source d'alimentation de ces charges peut résulter en une bonne utilisation du stack. En effet, dans certains cas, comme on le verra dans ce présent travail, la performance totale du système, à source conjointe est nettement meilleure que celle à source séparée. De la même manière, pour d'autres cas, différentes sources d'alimentation alimentant chacune séparément une charge peut donner un système plus rentable que celui à source commune.

2.Principe

Dans le système d'alimentation à source sèparèes, on suppose deux piles à combustibles (PAC1,PAC2), qui alimentent deux charges differentes (Charge1DC,Charg2DC) respectivement comme montrè sur la figure IV.1[1] .

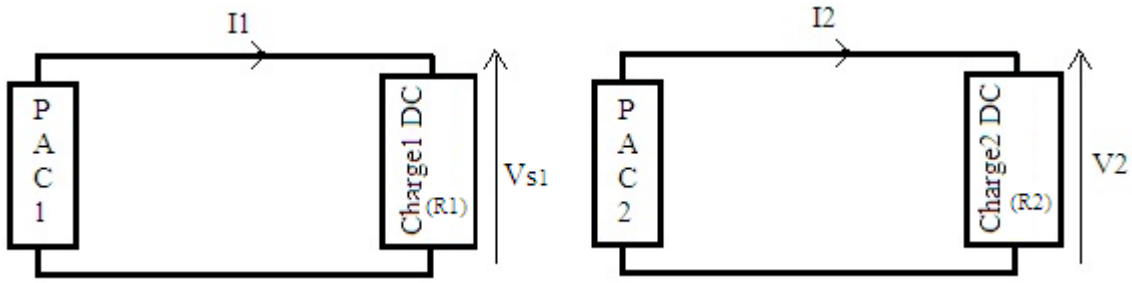


Figure IV.1 :Couplage direct sources separèes-charge

Dans le système d'alimentation à source commune ,les deux charges disposèes en parallèle seront alimentèes par les deux PACs en même temps assemblèes, par exemple, en série.

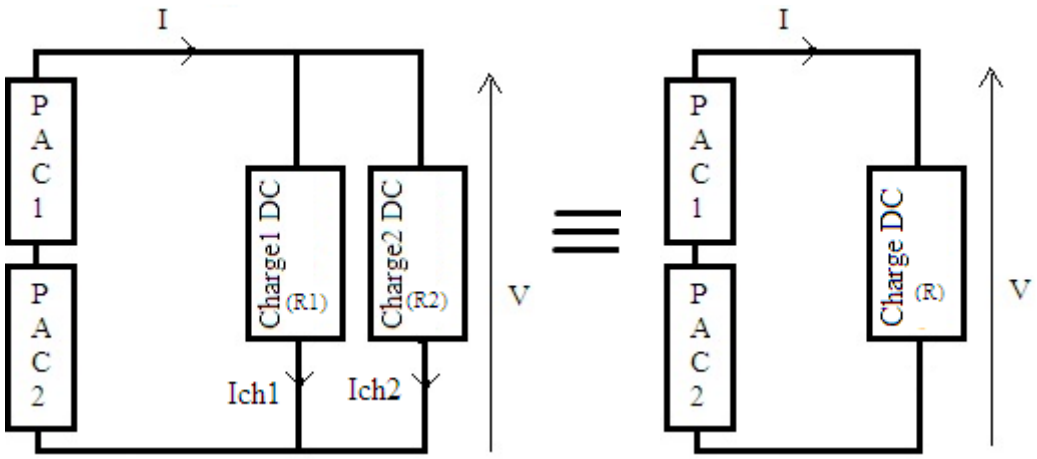


Figure IV.2 :Couplage direct source commune-charge

3. Etude d'un exemple

3.1Couplage direct sources séparées-charge

Pour cet exemple nous avons pris deux piles Avista-SR12 avec un nombre de cellules fixe pour la PAC1 n_{c1}=20 et pour la PAC2 n_{c2}=20,qui alimentent deux charges resistives sèparement R1=100 Ω,R2=80Ω. La tension au bornes de chaque PAC est :

Vs1= n_{c1}*V_{PAC1}=20*V_{PAC}. IV.1

Vs2= n_{c2}*V_{PAC2}=20*V_{PAC}. IV.2

$$V_{PAC} = 0.2817 - 0.85\ 10^{-3}(T - 298.15) + 4.308\ 10^{-5}T\left[ln\left(\frac{3}{4}P_{anode}\right) + \frac{1}{2}ln\left(\frac{1}{2}\ \ P_{cath}\right)\right] + \left[2.86\ 10^{-3} + 210^{-4}\ ln(A) + 4.3\ 10^{-5}ln\left(\frac{\frac{3}{4}P_{anode}}{1.0910^{6}exp\left(\frac{77}{T}\right)}\right)\right]\cdot T + \ 7.610^{-5}Tln\left(\frac{\frac{1}{2}\cdot P_{cath}}{5.0810^{6}\cdot e^{-\left(\frac{498}{T}\right)}}\right) - 1.93\ 10^{-4}Tln(i_{PAC}) - i_{PAC}\left[\frac{\left[1 + 0.03\left(\frac{i_{PAC}}{A}\right) + 0.062\left(\frac{T}{303}\right)^{2}\left(\frac{i_{PAC}}{A}\right)^{2.5}\right]}{\left[\lambda_{H_2O/SO_3^-} - 0.0634 - 3\left(\frac{i_{PAC}}{A}\right)\right]\cdot exp\left[4.18\left(\frac{T-303}{T}\right)\right]} + R_C\right] + B\left(1 - \frac{J}{J_{max}}\right).$$ IV.3

Vs1=R1*I1. IV.4

Vs2=R2*I2. IV.5

On va étudier donc chaque système sèparement et calculer les divers rendements d’utilisation obtenus.

Tout d’abord, on a fixè la pression P_{o2} à 1atm on a fait varier la température de 0 jusqu'à 100°C avec un pas de 10°C.

Les caractéristiques électriques sont avancèes dans les figures qui suivent.

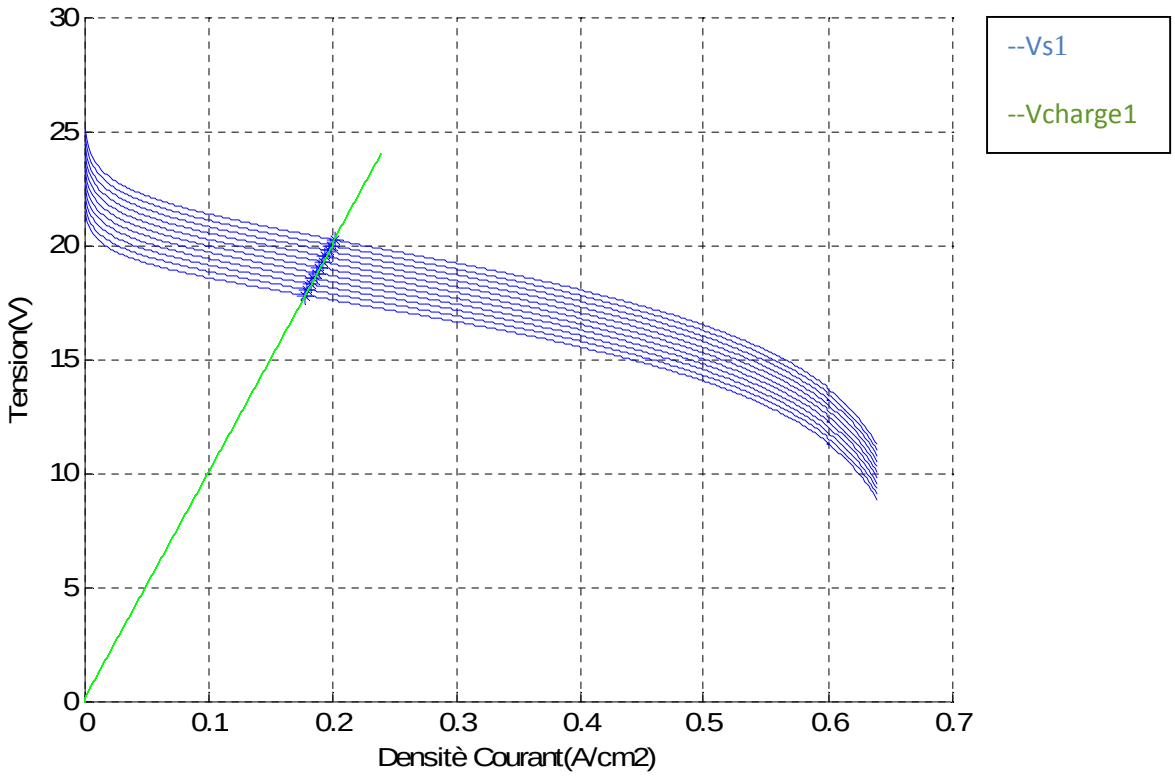


Figure IV.3: Caractéristique tension-densité de courant pour différentes températures pour la charge1.

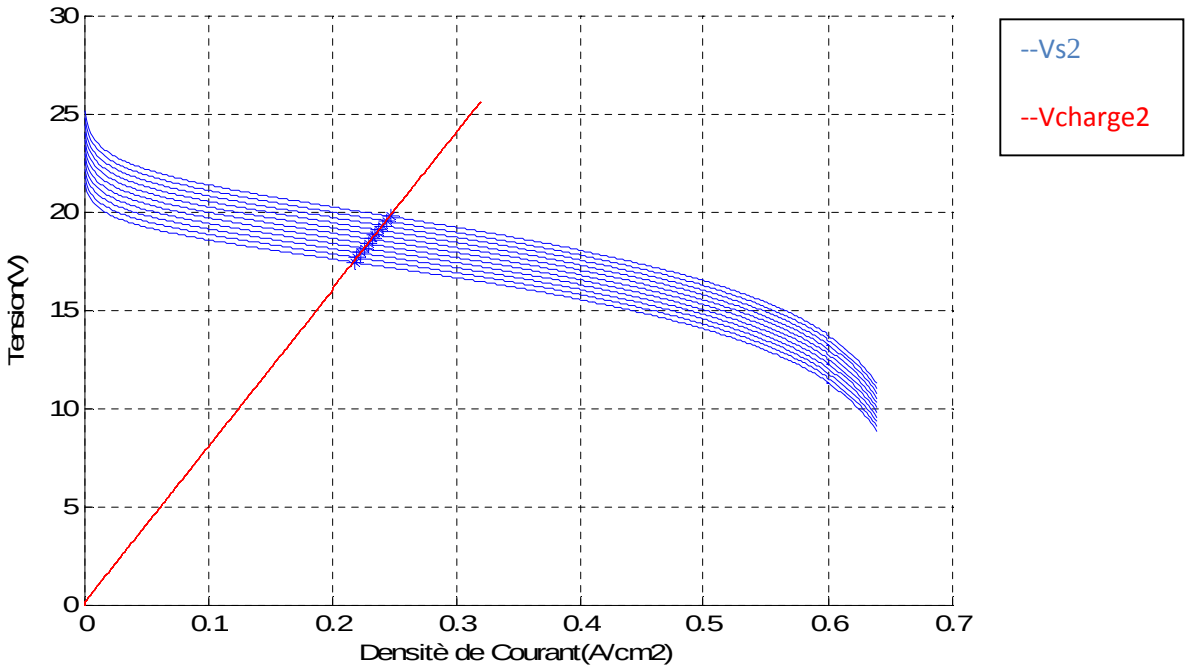


Figure IV.4 : Caractéristique tension-densité de courant pour différentes températures pour la charge2.

Les points de fonctionnement sont calculés pour chaque charge et pour des conditions de travail données.

Les figures IV.5 et IV.6 représentent la variation de la densité de puissance pour chaque charge.

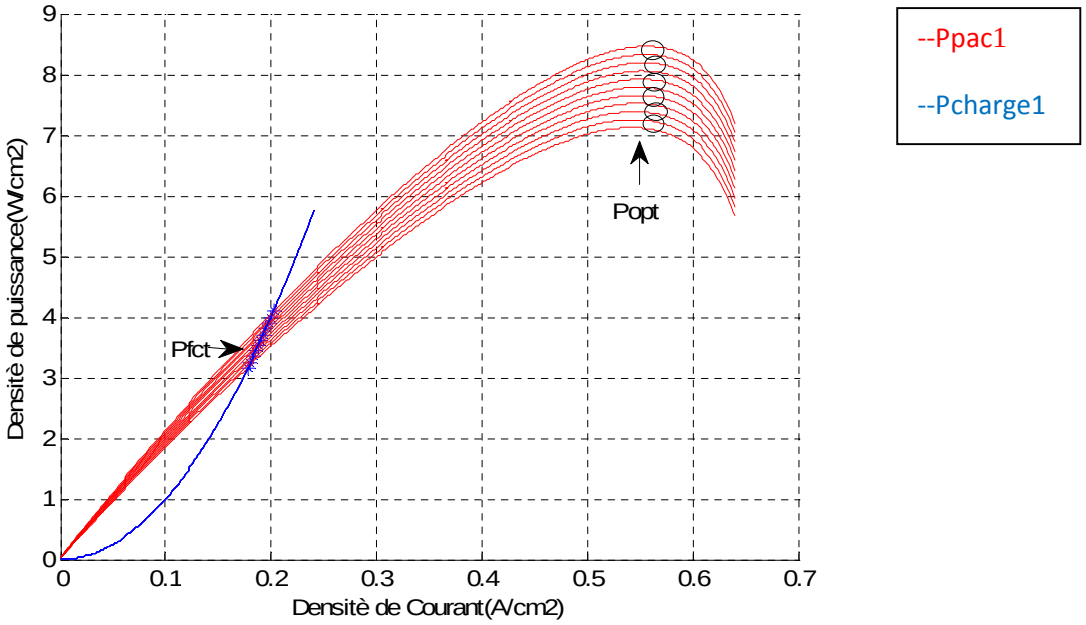


Figure IV.5 : Représentation P-J pour la charge1 pour différentes températures.

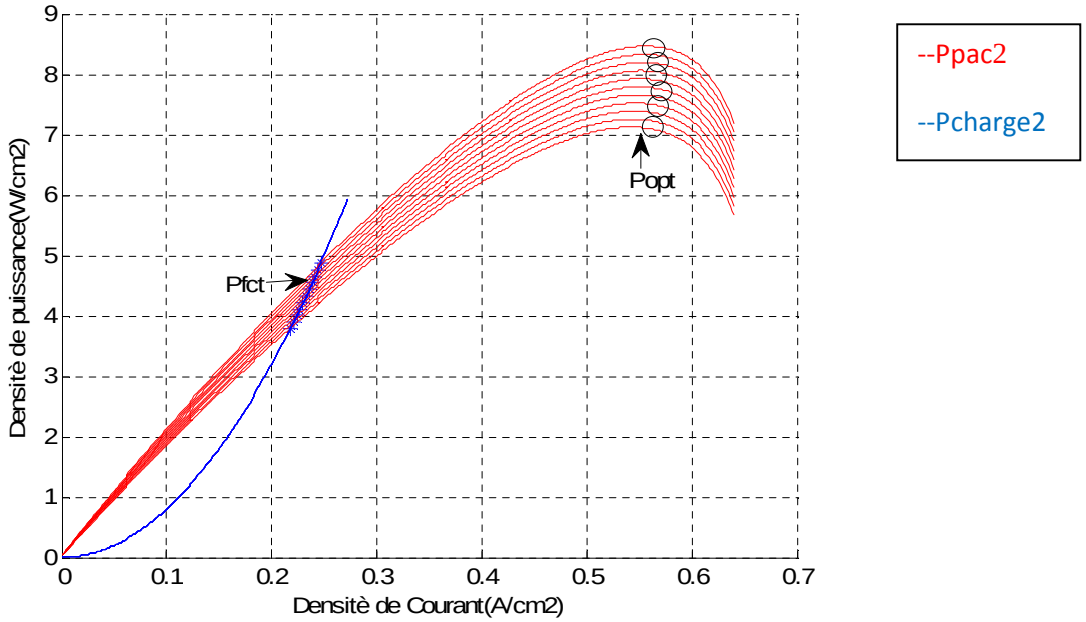


Figure IV.6 : Représentation P-J pour la charge2 pour différentes températures.

On remarque que chaque charge introduit son point de fonctionnement.

En figure IV.7 et IV.8,pour voir l'écart en densité de puissance, nous avons représenté respectivement les densités de puissance optimales et de fonctionnement et celle de la charge1 ainsi que la charge2.

Les figures IV.8 et IV.9 représentent les points de fonctionnement et les points optimaux pour chaque charge couplée au stack.Les points de fonctionnement sont obtenus par la résolution des équations IV.3,IV.4 et IV.5, Ces points ne sont pas toujours proches des points optimaux, ils sont variables en fonction de la charge et les conditions de travail.

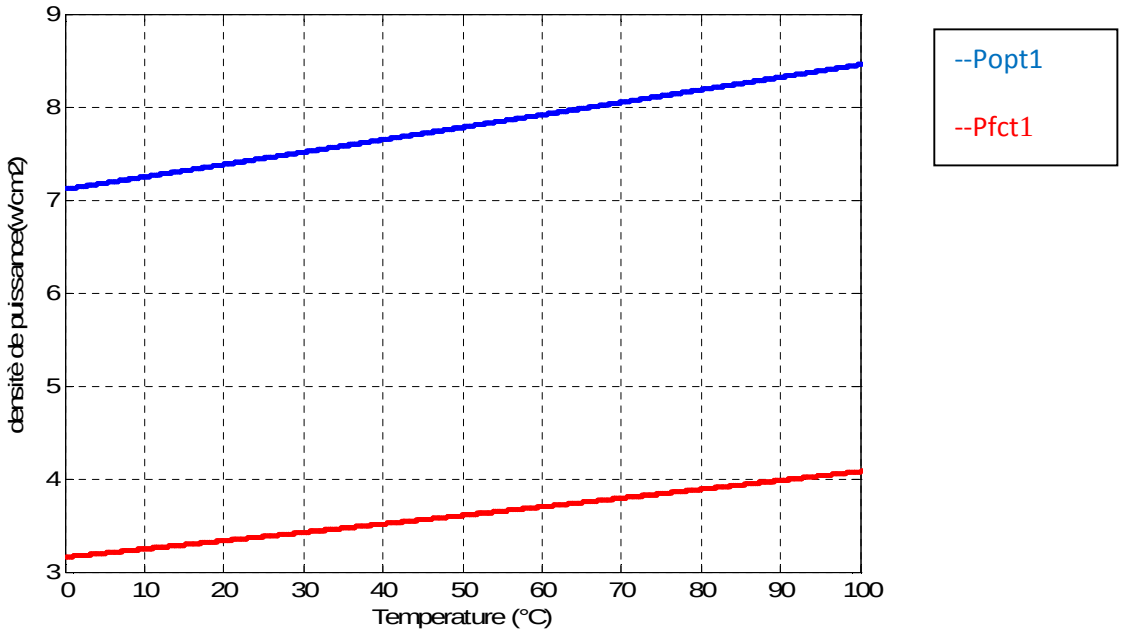


Figure IV.7 : Différentes densités de puissance obtenues pour la charge1 en fonction de la température.

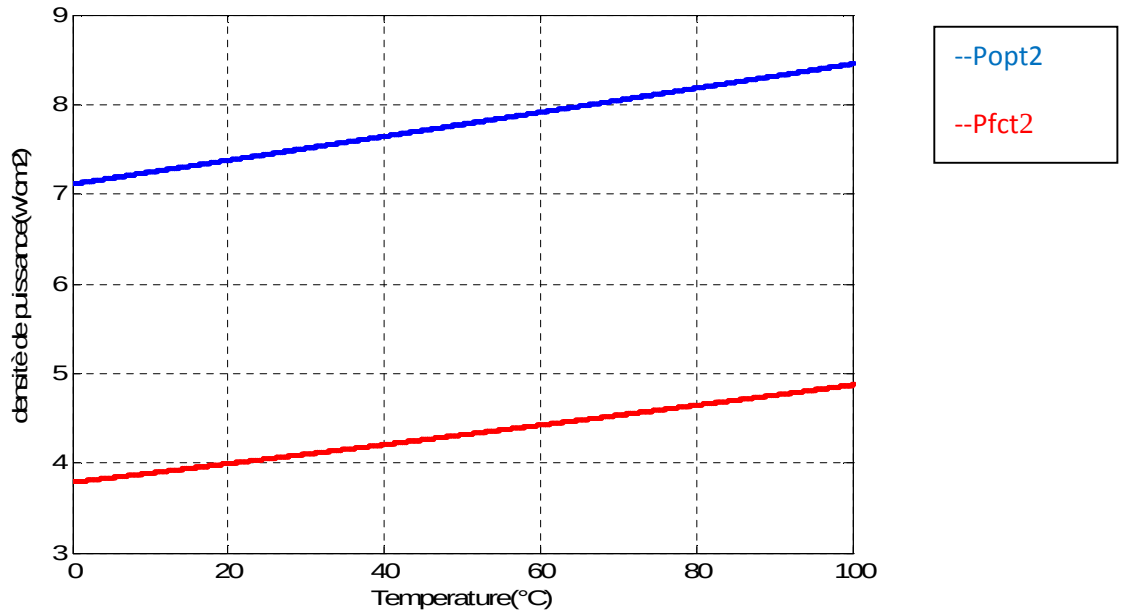


Figure IV.8 : Différentes densités de puissance obtenues pour la charge2 en fonction de la température.

Pour disposer d'une mesure de la qualité d'adaptation de connexion pour chaque charge nous nous tournons vers le calcul du rendement d'utilisation entrevu en équation III.6.

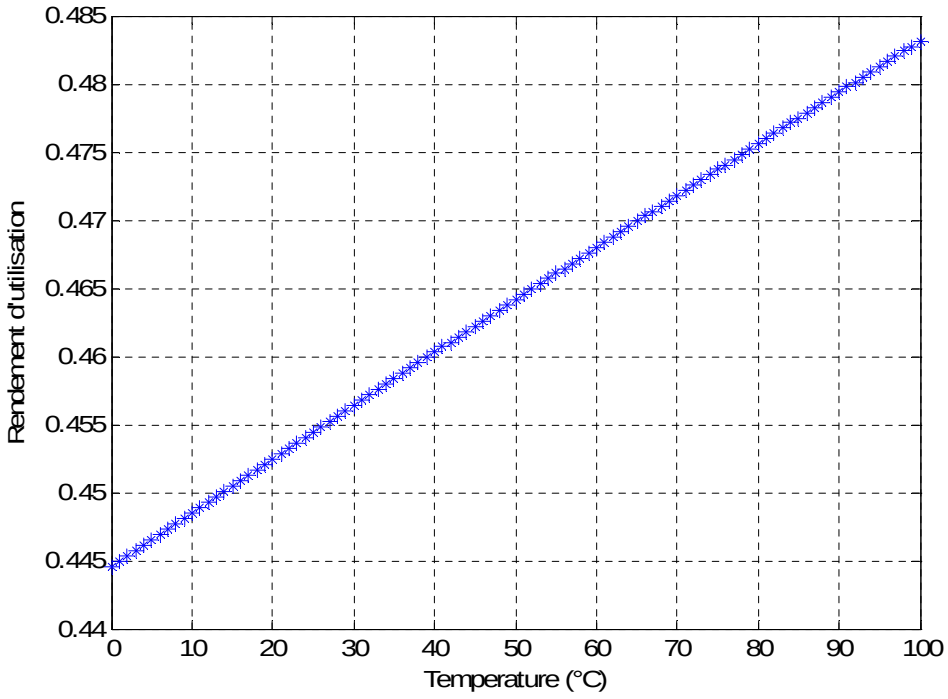


Figure IV.9 : Variation du rendement selon la température pour la charge1.

La figure IV.9 et IV.10 montrent les divers rendements obtenus pour chaque charge .Ces rendements varient selon la charge pour des conditions maintenues fixes.

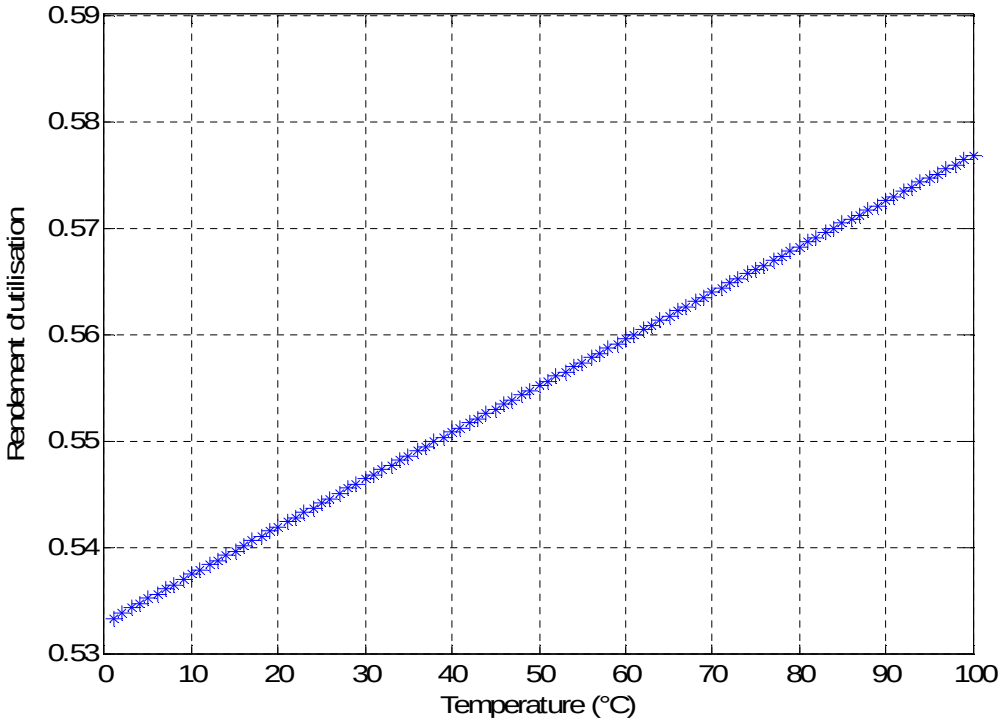


Figure IV.10: Variation du rendement selon la température pour la charge2.

Par exemple, pour une température de 10°C, le rendement d'utilisation de la charge1 égale à peu près à 44% tandis que pour la charge2 est égale à peu près à 53%.

Après calculs, les résultats obtenus pour les rendements d'utilisation moyens sont d'après l'équation III.6 :

$\eta util1moy$= 46%.

$\eta util2moy$= 55%.

Pour avoir le rendement global de notre système, on utilise :

$$\eta utilsmoy=\frac{\eta util1moy+\eta util2moy}{2}. \qquad \text{IV.6}$$

Il est évalué pour notre cas à : 50%.

Donc, cette valeur est valable pour ce couplage de nos charges à des sources PAC séparées.

Pour voir l'impact de la pression sur le fonctionnement de notre système dans ces qui suivra , on a maintenu la température à 40°C et on a fait varier la pression de 0 jusqu'à 10atm avec un pas de 1 atm.

Pour la charge1,les diverses caractéristiques électriques sont avancées en figure (IV.11).

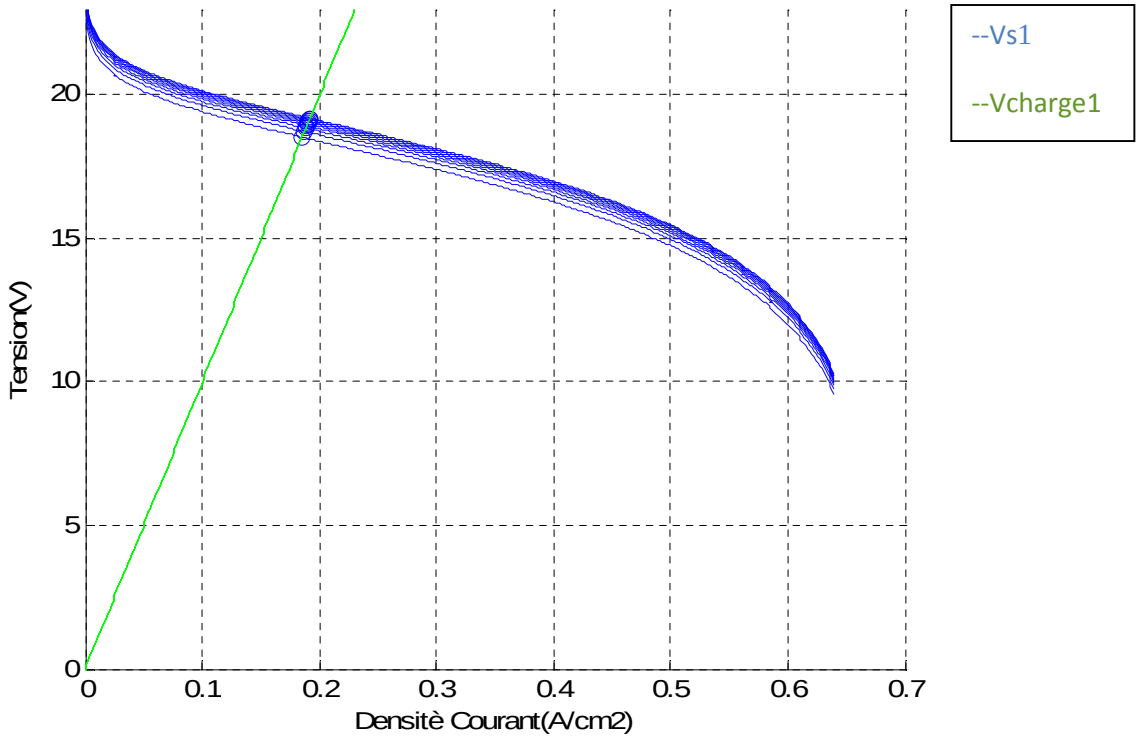


Figure IV.11.a: Caractéristiques V-J obtenues pour différentes pressions de la charge1.

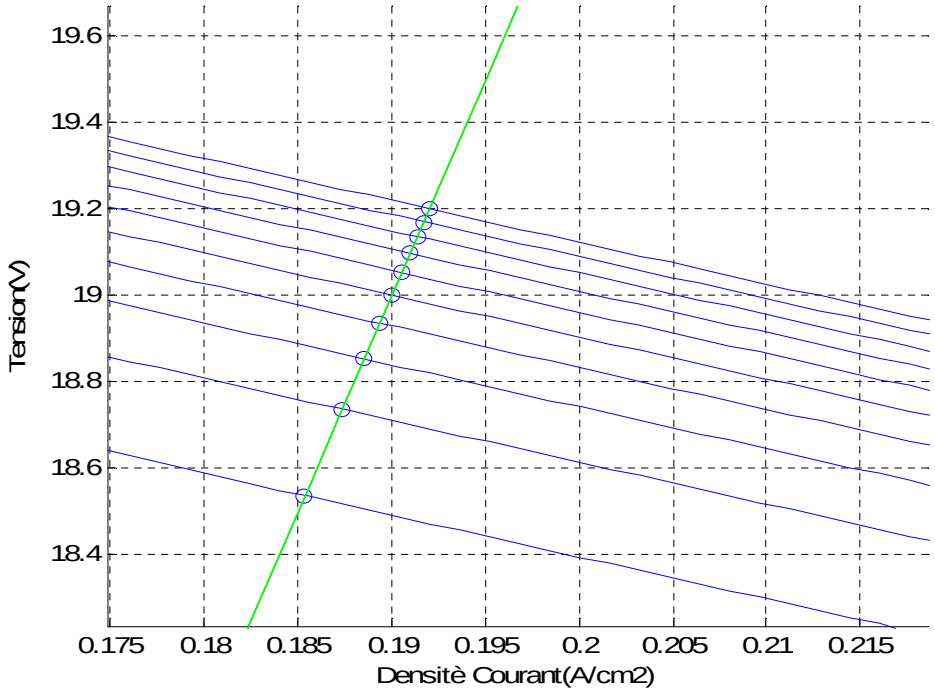


Figure IV.11.b : Caractéristiques V-J obtenues pour différentes pressions de la charge1 en zoome.

En figure IV, les caractéristiques de la charge2 sont avancées.

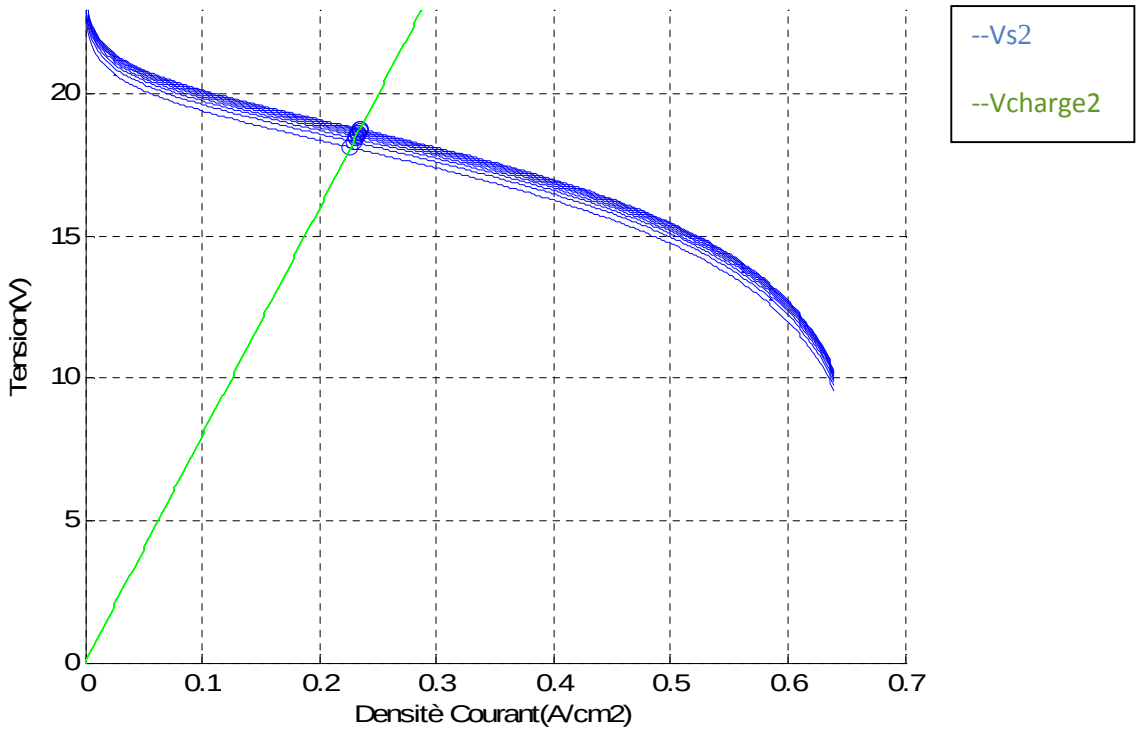


Figure IV.12.a: Caractéristiques V-J obtenues pour différentes pressions de la charge2.

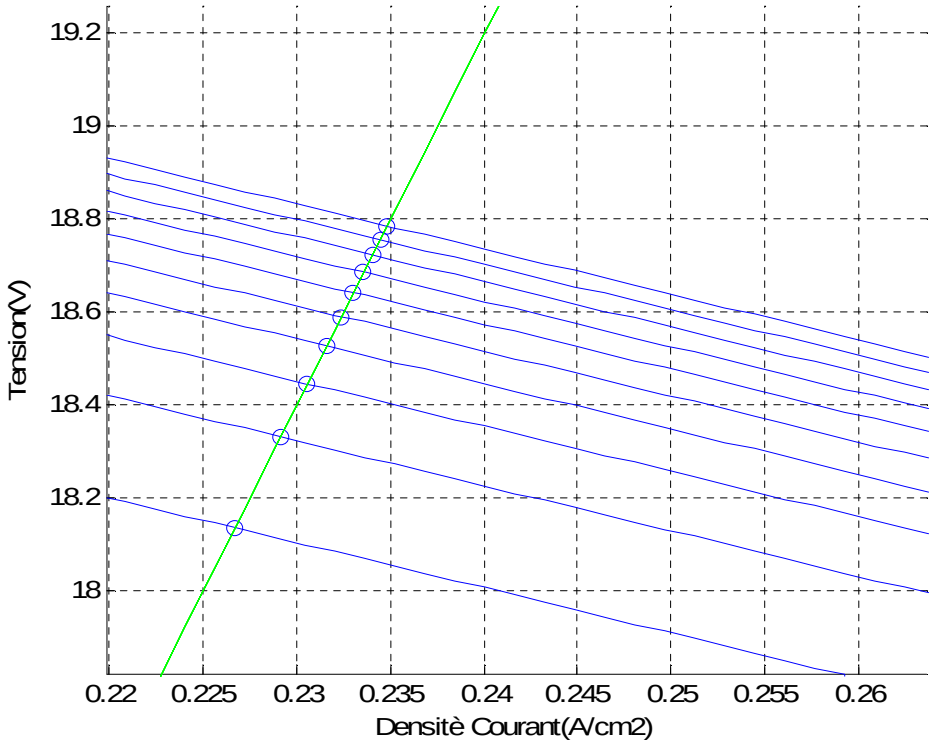


Figure IV.12.b: Caractéristiques V-J obtenues pour différentes pressions de la charge2en zoom.

Les courbes des densités de puissance vis-à-vis des densités de courant pour une variation de pression sont données en figure (IV.13, IV.14) pour la charge1.

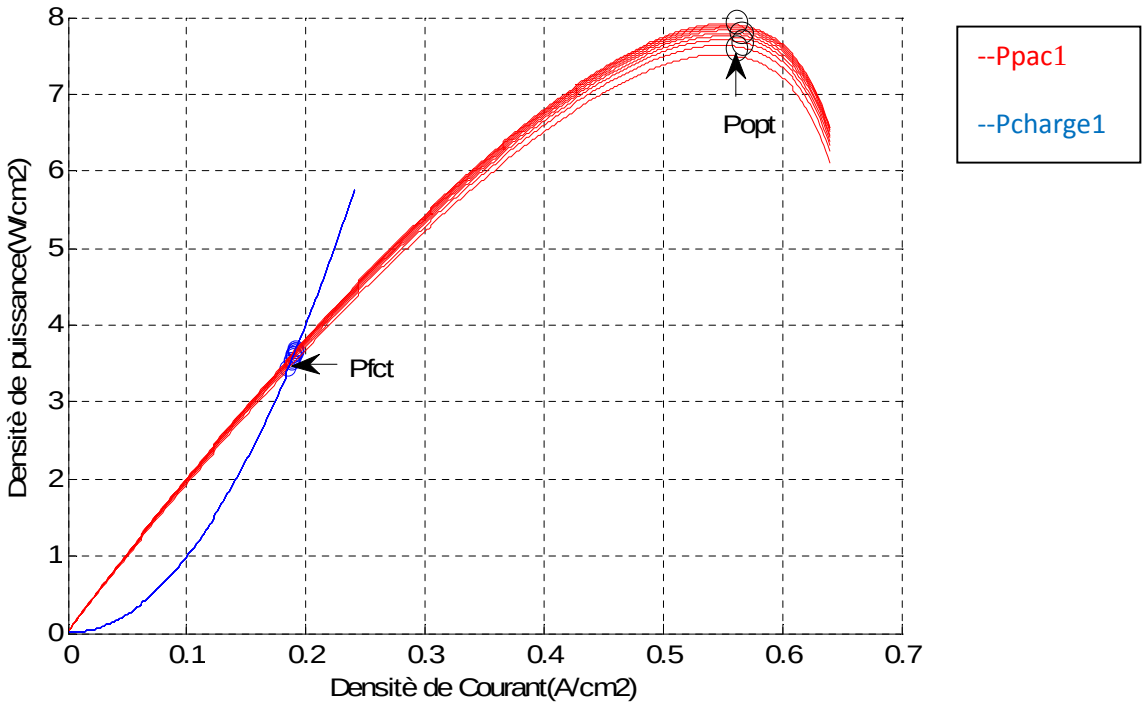


Figure IV.13.a : Représentation des densités de puissance pour différentes densités de courant pour la charge1.

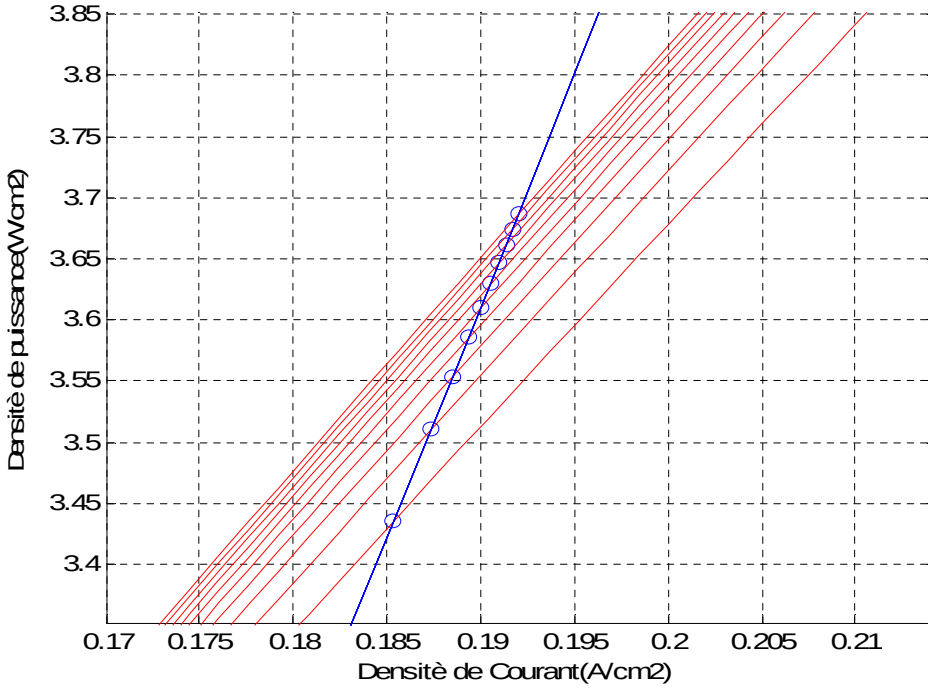


Figure IV.13.b : Représentation zoomée des densités de puissance pour différentes densités de courant pour la charge1.

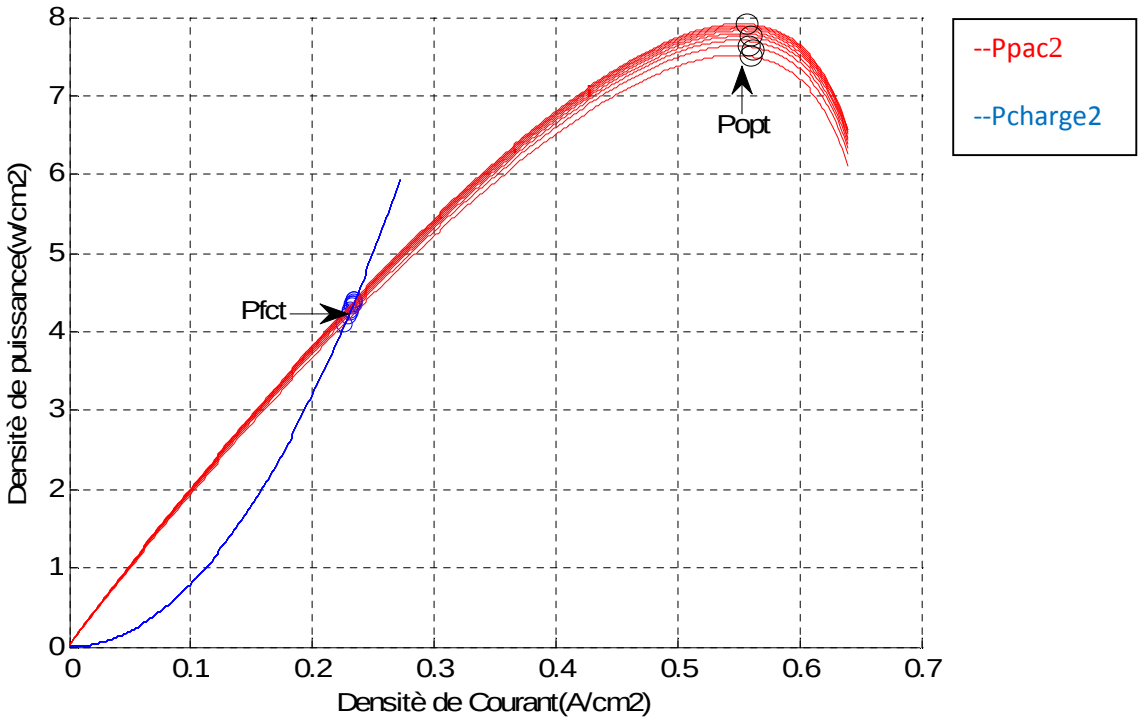


Figure IV.14.a : Représentation des densités de puissance pour différentes densités de courant pour la charge2.

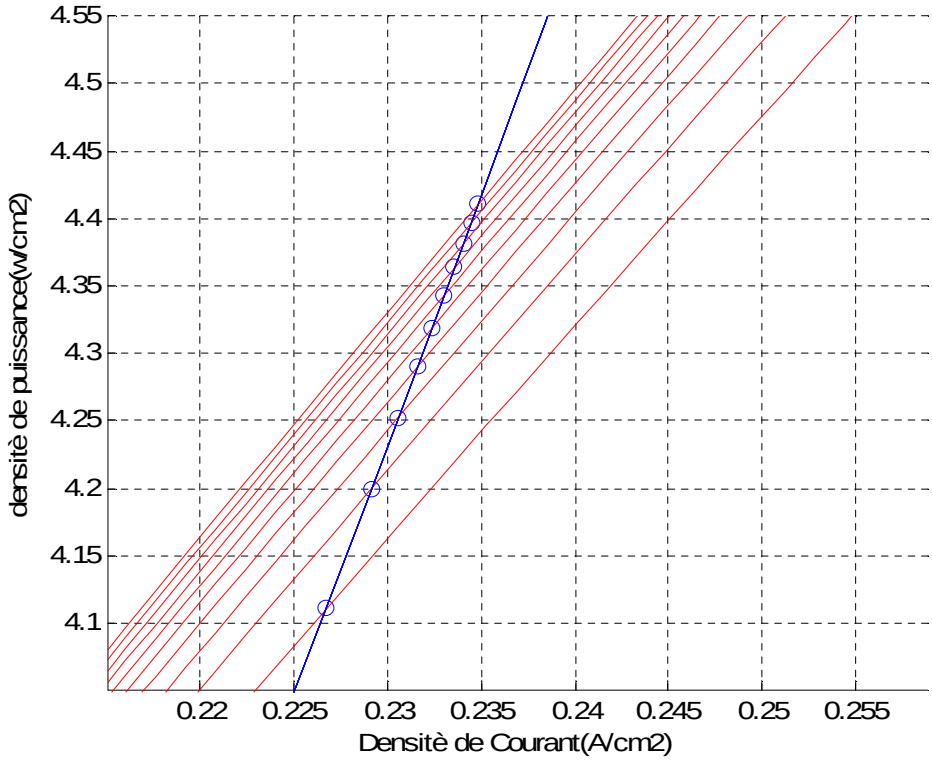


Figure IV.14.b : Représentation des densités de puissance pour différentes densités de courant pour la charge2 zoomée.

Chaque charge introduit son point de fonctionnement qui varie selon les conditions de travail.

Les diverses densités de puissance de fonctionnement et celle optimale sont représentées ci dessous pour voir les écarts existantes.

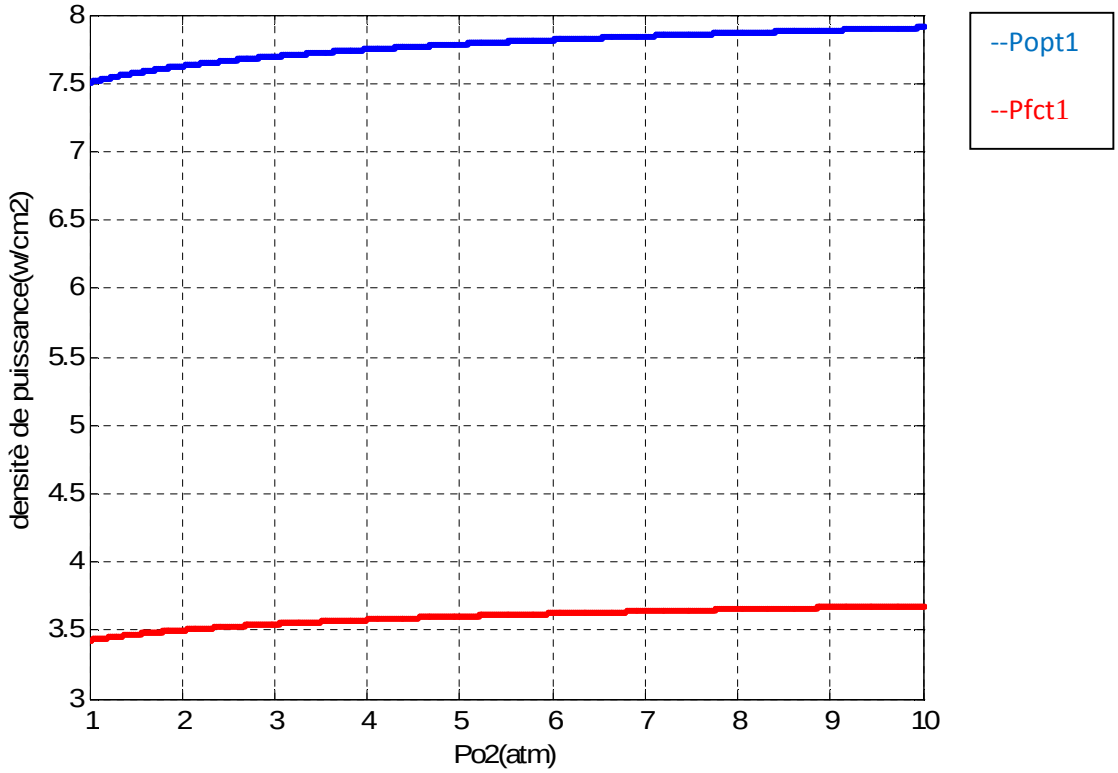


Figure IV.15 : Différentes densités de puissance obtenues pour la charge1 en fonction de la pression.

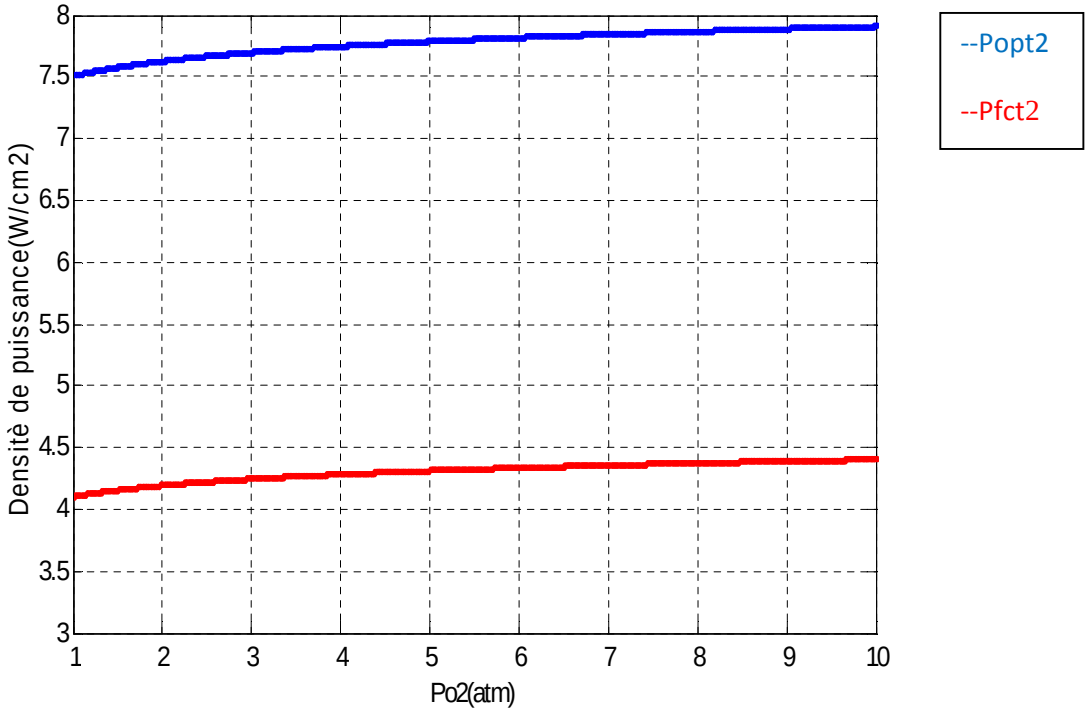


Figure IV.16: Différentes densités de puissance obtenues pour la charge2 en fonction de la pression.

En figure IV-17 et IV-18 sont représentés les divers rendements en utilisant l'équation III.7 pour chaque charge.

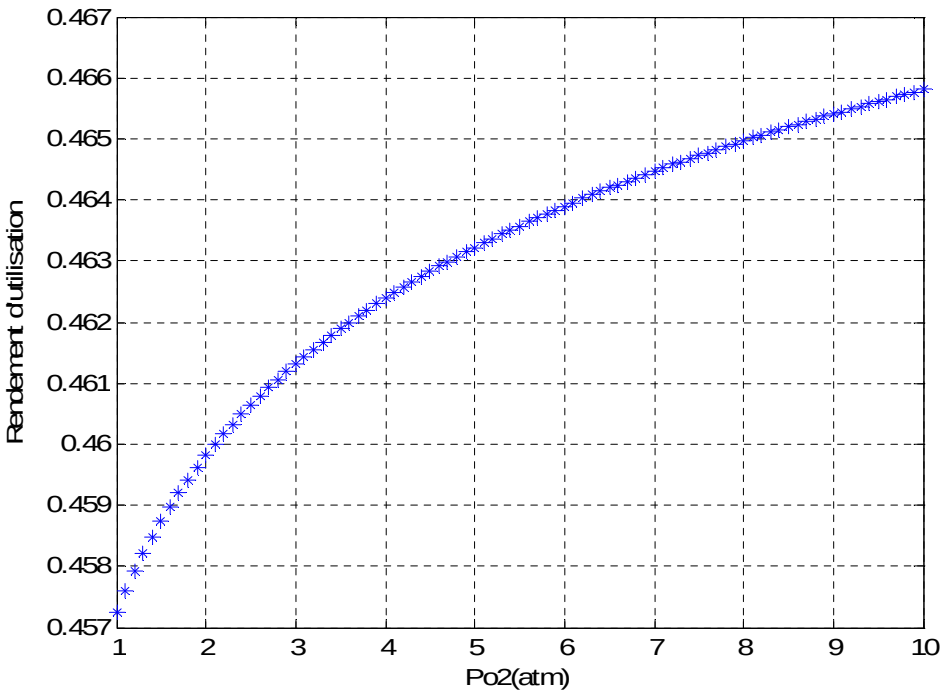


Figure IV.17: Variation du rendement selon la pression pour la charge1.

La valeur maximale du rendement est aux alentours de 46% pour cette charge.

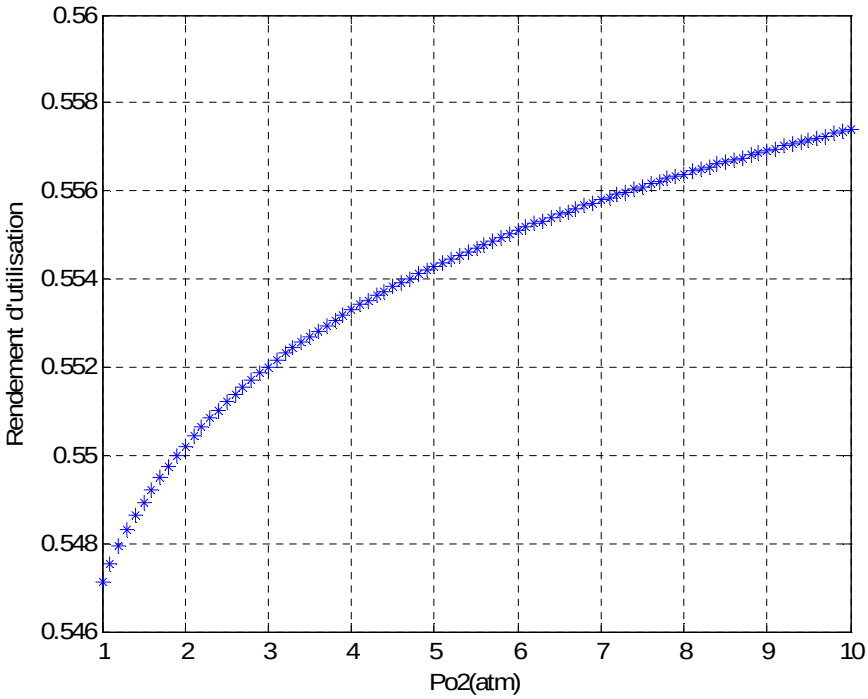


Figure IV.18 : Variation du rendement selon la pression pour la charge2.

La valeur maximale du rendement est égale à peu prés à 55% pour cette deuxième charge.

Le calcul du rendement d'utilisation moyen va nous renseigner sur la qualité de ce type de couplage de chaque charge.

Après le calcul selon l'équation III.7 les résultats obtenus sont :

ηutil1moy= 46%.

ηutil2moy= 55%.

Le rendement du global de notre système défini :

$$\eta utilsmoy=\frac{\eta util1moy+\eta util2moy}{2}. \qquad \text{IV.7}$$

est évalué à : 50%.

Donc, nous venons de trouver que pour ces charges le rendement d'utilisation moyen est de 50%.

Nous allons voir si on peut améliorer ce rendement ou pas en utilisant une source d'alimentation conjointe.

3.2 Couplage direct source commune-charges

La même étude est reprise en supposant les 2 charges charge1 et charge2 disposées en parallèle. Leur résistance équivalente R=44.44Ω alimentées par 2 piles à combustible regroupées en série comme représenté dans la figure IV.2 .

Pour des conditions de travail maintenues constantes, nous calculons

$$\mathrm{I_{ch1}} = \frac{V}{R_1} \qquad \text{IV.8}$$

$$\mathrm{I_{ch2}} = \frac{V}{R_2} \qquad \text{IV.9}$$

$$\eta_{g1} = \frac{P_{fct1}}{P_{opt}} = \frac{\mathrm{I_{ch1}}.\mathrm{V}}{P_{opt}} \qquad \text{IV.10}$$

$$\eta_{g2} = \frac{P_{fct2}}{P_{opt}} = \frac{\mathrm{I_{ch2}}.\mathrm{V}}{P_{opt}} \qquad \text{IV.11}$$

$$\eta_{gsys} = \frac{P_{fct}}{P_{opt}} = \frac{V.I}{P_{opt}} \qquad \text{IV.12}$$

$$\eta_{gmoy} = \frac{1}{T_{max}-T_{min}} \int_{T_{min}}^{T_{max}} \eta_{gsys}(T)\, dT \qquad \text{IV.13}$$

$$\eta_{gmoy} = \frac{1}{P_{max}-P_{min}} \int_{P_{min}}^{P_{max}} \eta_{gsys}(P)\, dP \qquad \text{IV.14}$$

Avec :

$\mathrm{I_{ch1}}$: le courant qui traverse la charge1.

$\mathrm{I_{ch2}}$: le courant qui traverse la charge2.

I: le courant qui traverse la charge èquivalente.

Nous avons après calculs, représenté les caractéristiques de la charge équivalente connectée au stack.

La figure IV.19 montre les caractéristiques V-J de notre charge pour diverses températures.

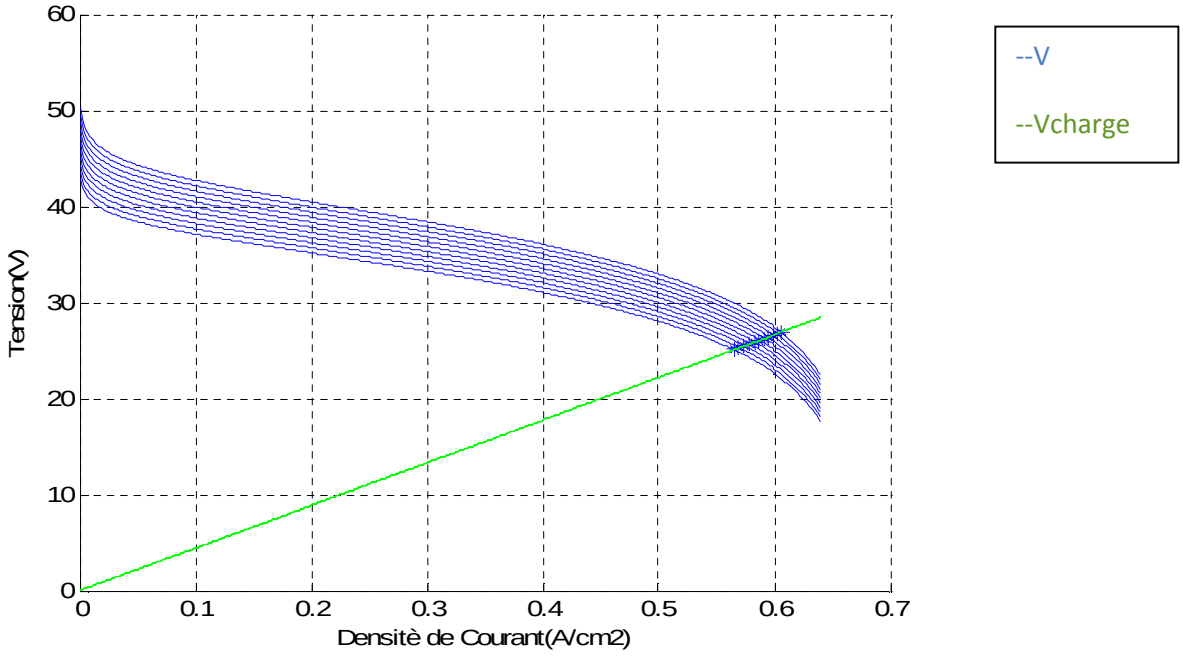


Figure IV.19 : Caractéristiques V-J pour différentes températures pour la charge équivalente.

La figure IV.20 illustre la variation des densités de puissance pour notre charge pour différentes températures.

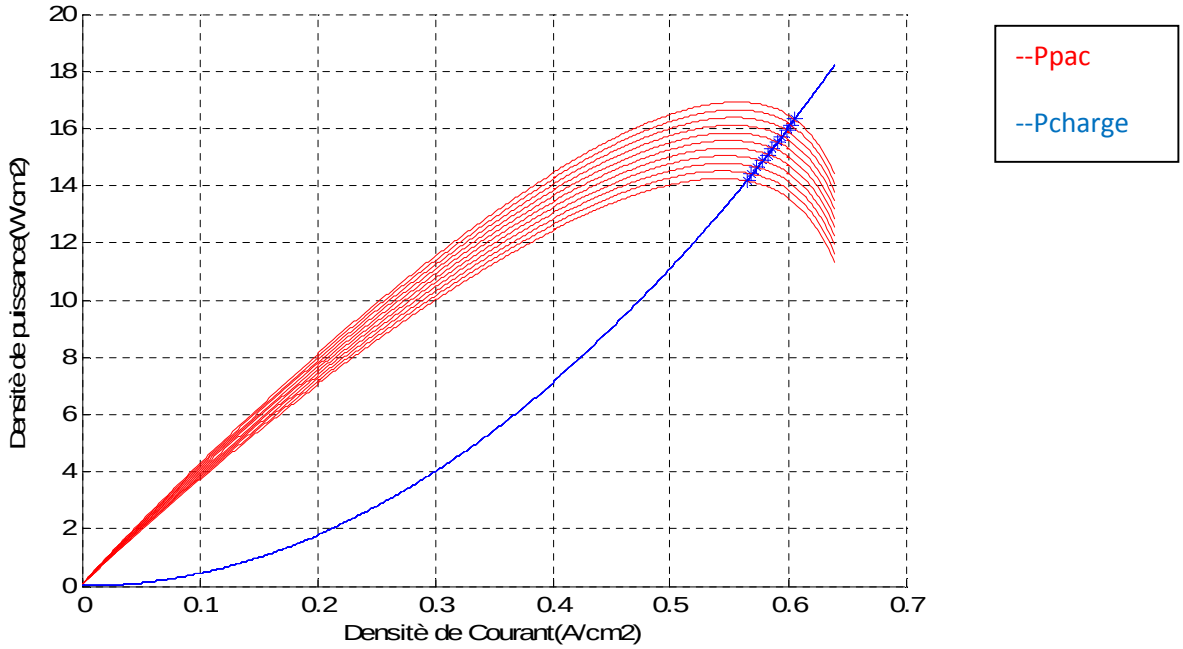


Figure IV.20: Représentation des densités de puissance en fonction de densité de courant pour la charge équivalente pour différentes températures.

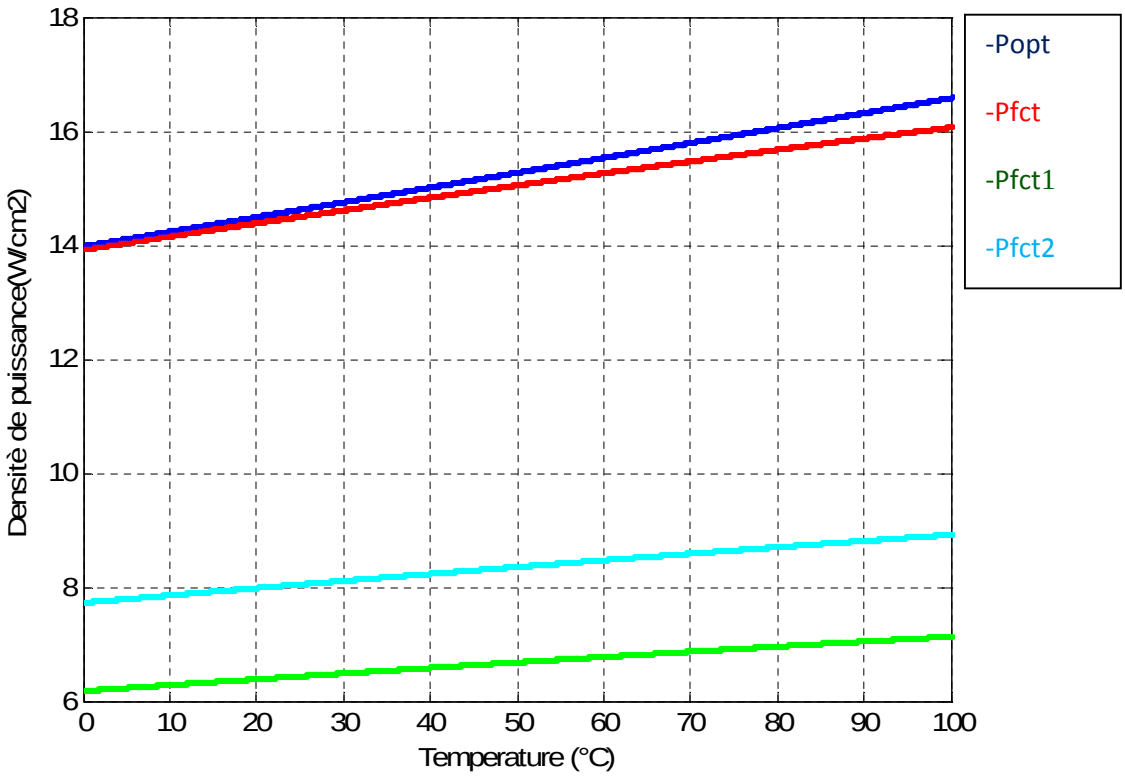


Figure IV.21: Différentes densités de puissance obtenues pour toutes les charges en fonction de la température.

La figure IV.21 montre l'évolution des points de fonctionnement et des points optimaux pour plusieurs températures. On voit que chaque charge présente son point de fonctionnement. Le fonctionnement du système global s'approche de celui optimal.

En figure IV.22 sont representèes les divers rendements d'utilisation obtenus selon selon les èquations (IV.10, IV.11, IV.12).

La variation des divers rendements est illustrée en figure IV.22.

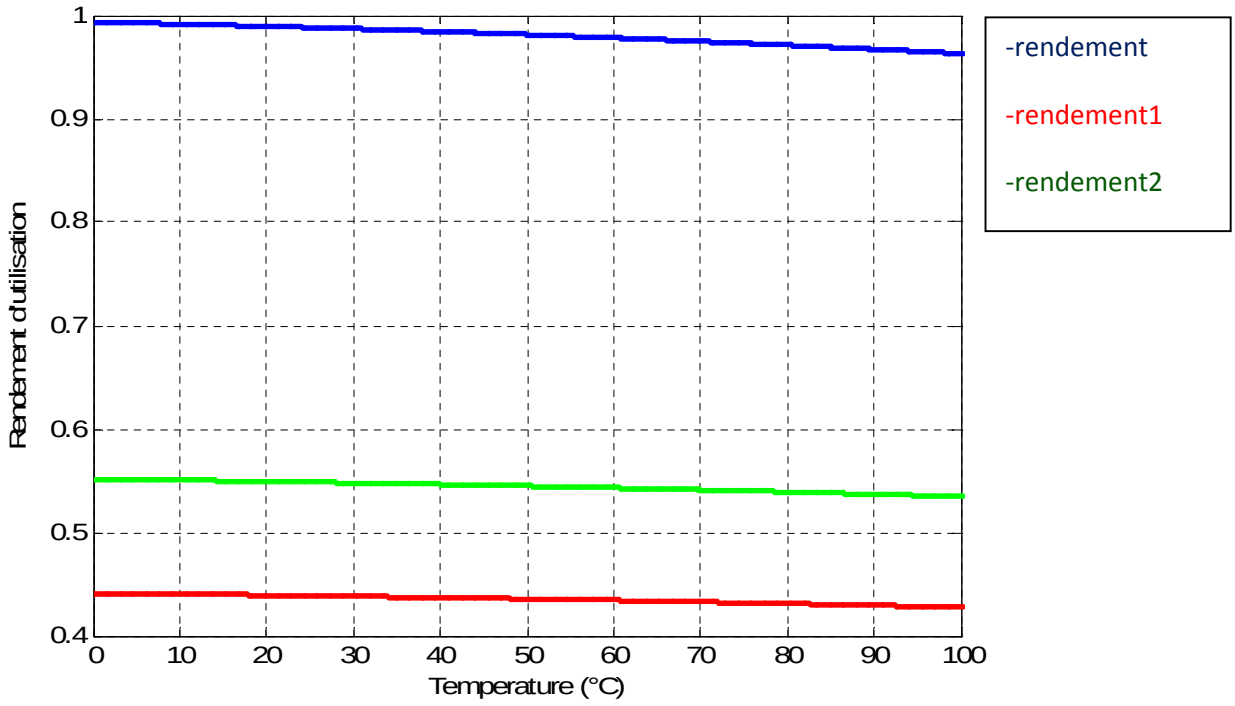


Figure IV.22: Variation du rendement selon la température pour toutes les charges

Nous remarquons que chaque charge possède un rendement différent de l'autre charge pour des conditions données fixes.

Le calcul du rendement d'utilisation moyen pour chaque charge obéissant à l'équation (III.6).

$\eta util1moy = 43\%$.

$\eta util2moy = 54\%$.

$\eta gmoy = 98\%$ selon l'équation IV.13.

Nous remarquons que la charge équivalente présente un bon rendement d'utilisation de la sorte, l'exploitation des stacks est excellente.

A présent, nous allons voir comment répond notre système à des variations de la pression.

Pour le système préétudié, nous traçons pour la charge équivalente et le stack les diverses caractéristiques électriques pour des variations de la pression pour une temper ture fixe.

La figure IV.23 montre la variation des caractéristiques V-J obtenus pour charge équivalente vis-à-vis de la pression.

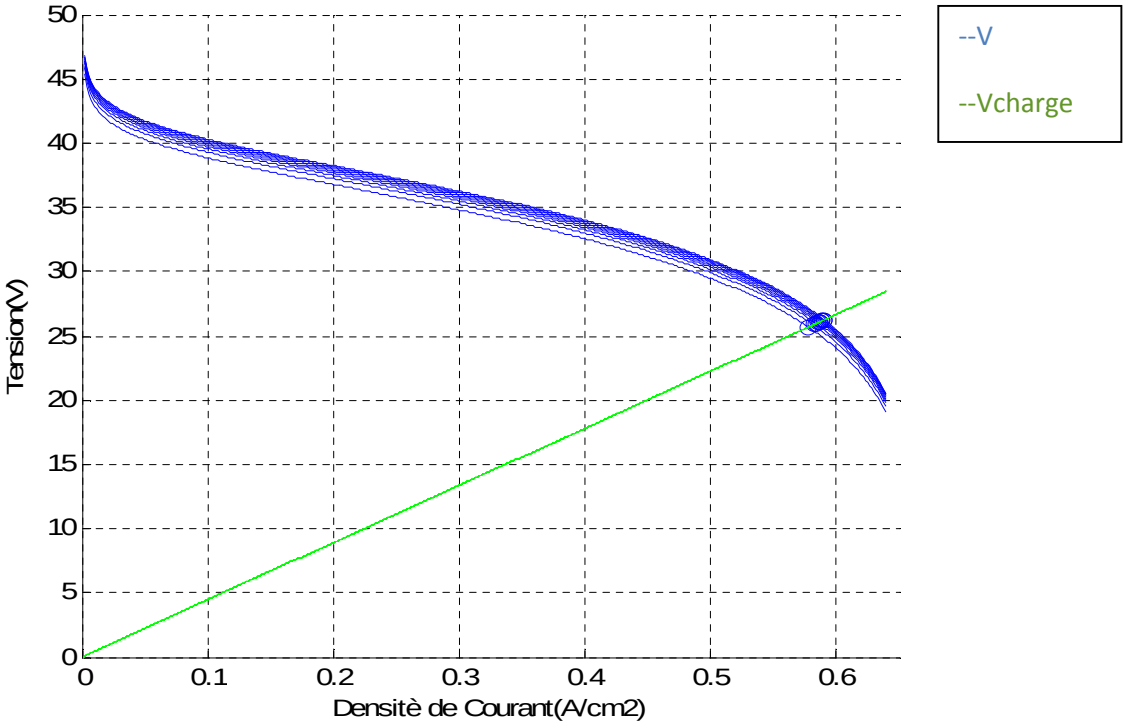


Figure IV.23.a: Caractéristique tension-densité de courant pour différentes pressions pour la charge équivalente.

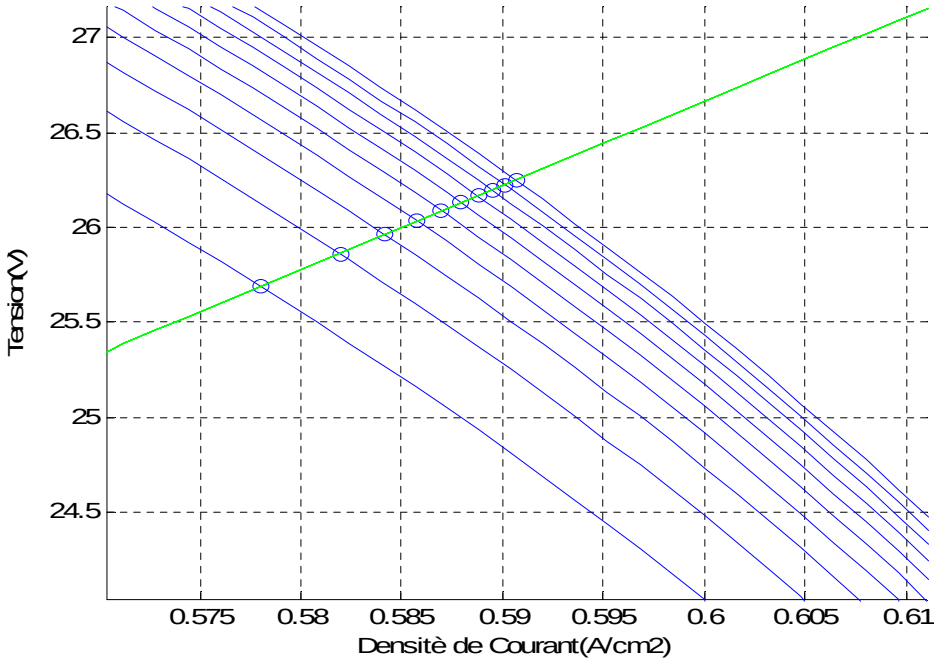


Figure IV.23.b: Caractéristique tension-densité de courant pour différentes pressions pour la charge équivalente zoomée.

La figure IV.24 montre la variation de la densité de puissance vis-à-vis la densité de courant.

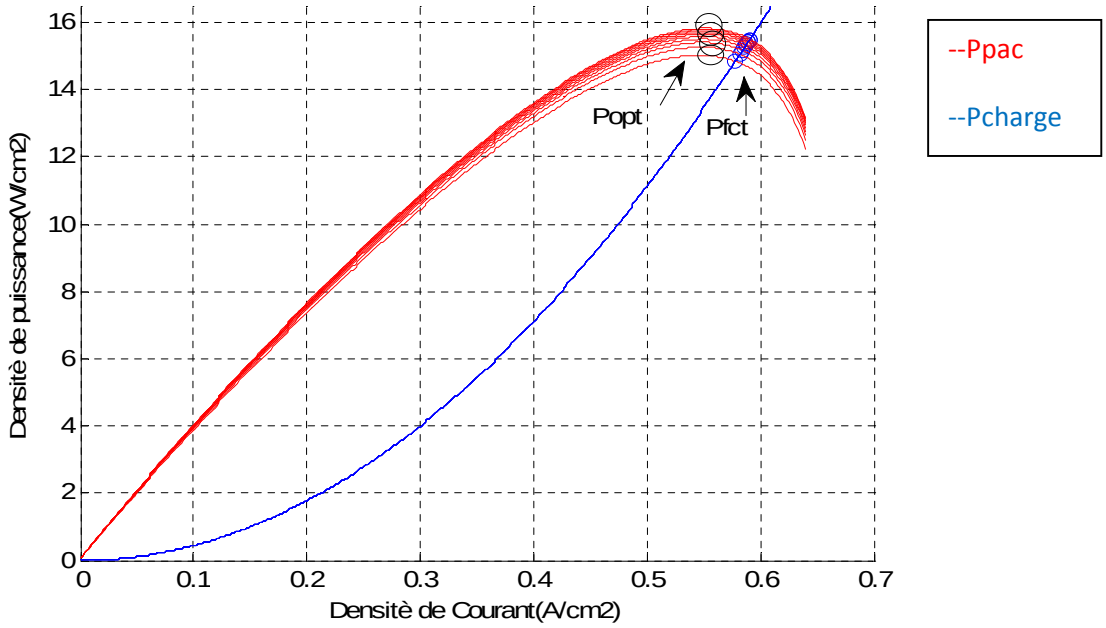


Figure IV.24.a: Représentation des densités de puissance pour différentes densités de courant pour la charge équivalente.

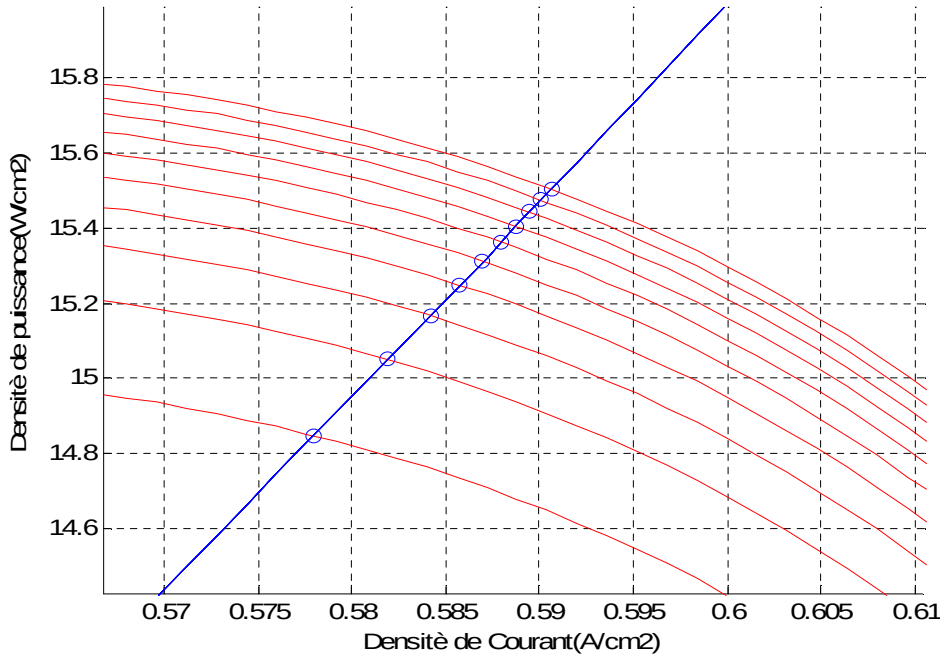


Figure IV.24.b: Représentation des densités de puissance pour différentes densités de courant pour la charge équivalente zoomée.

D'après la figure IV.24.a le système opère proche dans une zone proche de celle optimale.

Nous avons représenté en figure IV.25 la variation de la densité de puissance selon la pression.

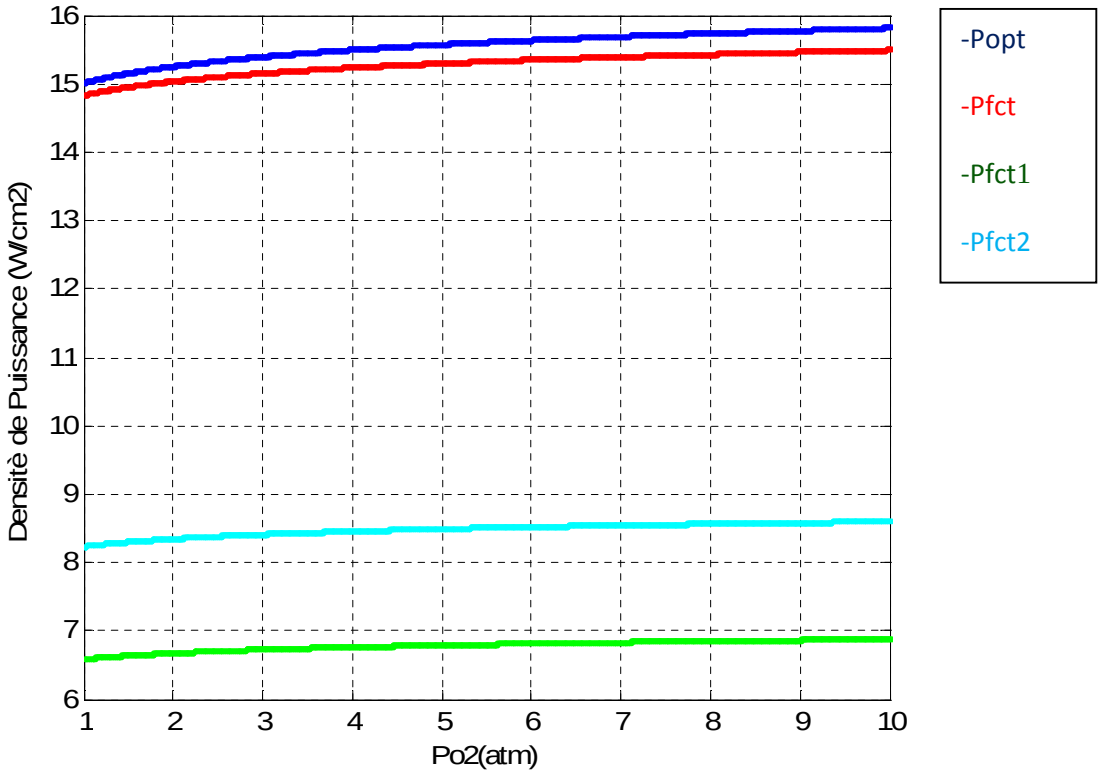


Figure IV.25: Différentes densités de puissance obtenues pour toutes les charges en fonction de la pression.

Nous remarquons que la densité de puissance de la charge équivalente est très proche de celle optimale annonçant de la sorte une bonne qualité de connexion malgré que la densité de puissance de fonctionnement de chaque charge s'éloigne de celle optimale.

Les rendements d'utilisation obtenus selon les équations (IV.10,IV.11,IV.12) sont illustrés en figure (IV.26).

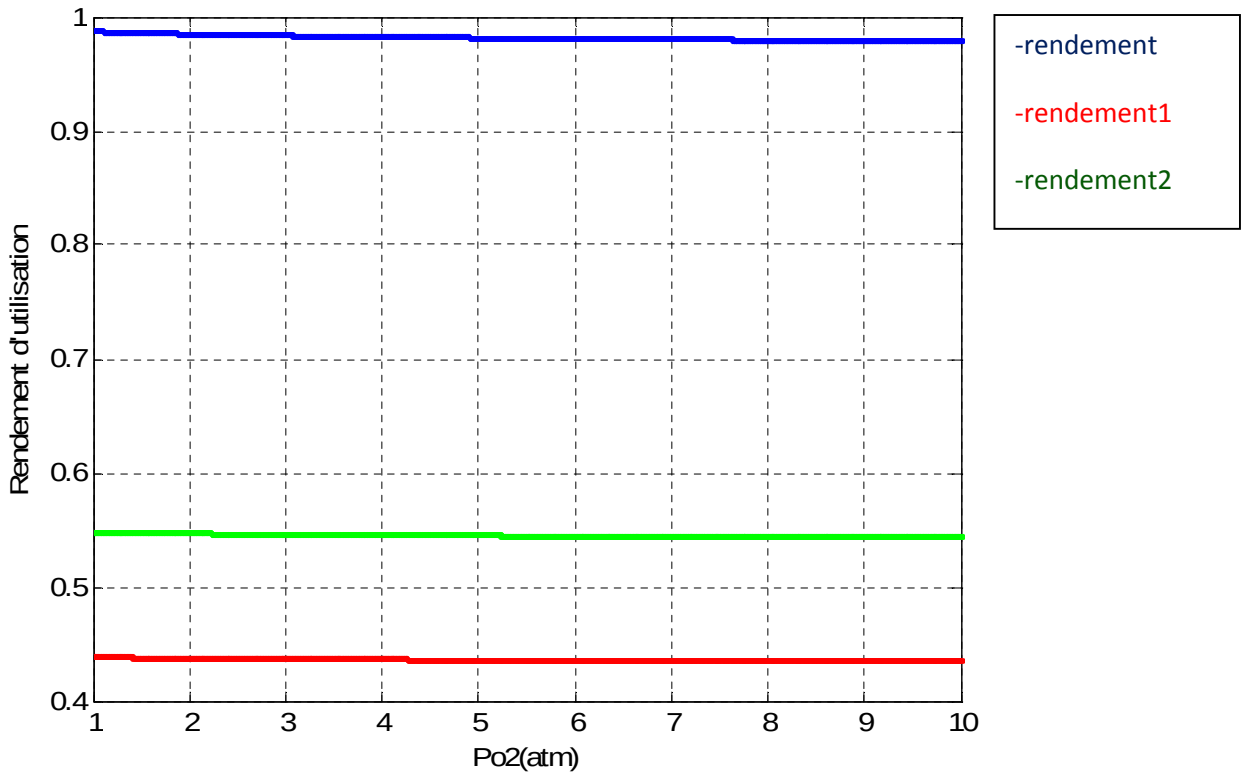


Figure IV.26: Variation du rendement selon la pression pour toutes les charges.

Le calcul des divers rendements d'utilisation de chaque charge obéissant à l'équation (III.7). à donné :

ηutil1moy= 43%

ηutil2moy= 54%

ηutilsmoy= 98% selon l'équation III.7.

Nous voyons d'après ces résultats, que la charge équivalente exploite efficacement le stack de PAC.

La charge équivalente présente un très bon rendement d'utilisation pour ce cas d'exemple .Nous venons d'établir la méthode à suivre .Dans d'autre cas d'exemples, l'approvisionnement par voies séparées peut s'annoncer rentable.

4.Conclusion

D’après cette présente étude, les valeurs de nos charges imposeront le choix d’une source commune ou séparée. Opter pour un système à source commune ou par contre séparée est étroitement lié aux charges à alimenter.

L'étude consacrée dans cette partie a permis de voir que pour un système à charges multiples, il y'a lieu de comparer la performance du système à source séparée avec celle à source commune. L'intérêt est fondé sur la maximisation du rendement global de notre système stack-charge pour une meilleure exploitation du stack de PACs.

Bibliographie

[1]Zerhouni Fatima Zohra, «Développement et optimisation d’un générateur énergétique hybride propre à base de PV-PAC» **,** thèse de doctorat,USTOMB,2009.

Chapitre V

Connexion stack -charge par commutation

1. Introduction

Dans un système stack de PAC-charge couplé directement, il est important de faire correspondre la charge au stack autrement la puissance fournie à la charge pourrait être nettement inférieure à la puissance maximale disponible dans le stack de PAC. Cette perte de puissance résultant de cet écart se traduirait par une diminution du rendement du système global. Nous proposons une méthode d'amélioration de ce rendement dans cette présente étude.

Nous présentons une technique pour trouver les niveaux de Po2, de T pour permettre le changement de configuration du stack de PAC pour une charge donnée.

La méthode présentée dans le présent travail est basée sur une recherche continue de la meilleure configuration du stack de PAC en changeant les différentes connexions du stack afin de minimiser les pertes engendrées dans un système stack de PAC-charge couplé directement [1].

2. Principe de la méthode

Par cette présente étude, par exemple, nous allons orienter la commutation vers un récepteur de type résistif.

On suppose avoir un nombre n_c constant de PAC assemblées par exemple suivant deux configurations Np1xNs1 (configuration 1) et Np2xNs2(configuration 2). Le principe consiste au calcul pour chaque P_{O2} (la température étant gardée constante) des points d'intersection Pcom définis par les coordonnées (Vcom,Jcom) des caractéristiques V-J de la configuration 1 et de la configuration 2 adoptées. Le même travail est repris pour P_{O2} constante et T variable. Ces points d'intersection sont les points propices à la commutation d'une configuration à une autre. Ils introduisent la résistance de commutation Rcom définie par:

$$Rcom = \frac{Vcom}{Icom} \ (\Omega). \qquad V.1$$

Quelle que soit la résistance R, par simple aperçu de sa valeur par rapport à R_{com}, on dira que telle configuration sied à R au lieu d'une autre pour telles conditions de travail parce qu'elle lui procurera plus de puissance. Pour des conditions spécifiques de travail, on dira que toute charge R de valeur inférieure à R_{com} doit lui être établie la configuration 2 (cas de R2) figure (V.1). Par contre, si R est supérieure à R_{com}, la configuration 1 lui sera attribuée (cas de R1).Ceci s'affirme par la figure (V.1) .

Pour la résistance R1, si la configuration 1 est choisie, R1 fonctionnera avec la densité de puissance Pfcta. Néanmoins, si elle est alimentée par le stack assemblé en configuration 2, la densité de puissance extraite serait Pfcta' qui est inférieure à Pfcta d'où nécessité d'adopter la configuration 1. En ce qui concerne la charge R2, si la configuration optée est la configuration 1, le stack y débitera Pfctb. Par contre, si l'assemblage adopté est la

configuration 2, la densité de puissance recueillie aux bornes de R2 serait Pfctb' >Pfctb d'où la configuration 2 est la configuration la plus adéquate à R2.

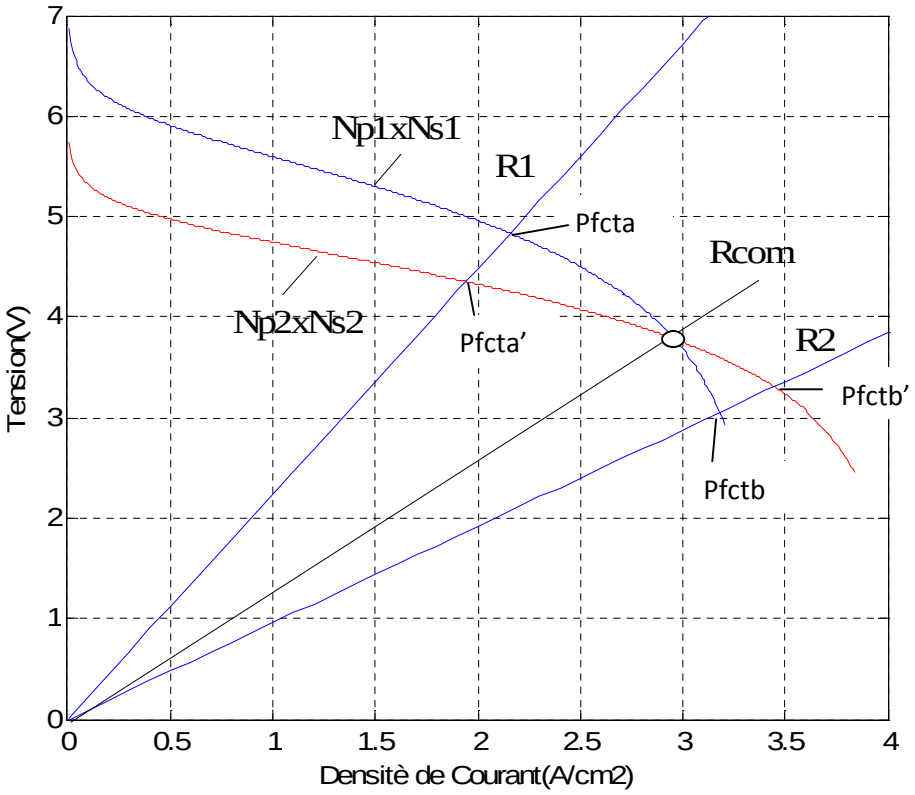


Figure V.1 : Divers caractéristiques électriques V-J de la tension pour les deux configurations.

3.Etude d'un exemple

L'exemple en Figure (V.1) représente la caractéristique V-J du stack de la pile Avista SR-12 avec un nombre de cellule n_c=30 à Po2=1atm, T=40°C.Pour les configurations choisies : configuration 1 ($N_{p1}xN_{s1}$ =5x6) et la configuration 2 ($N_{p2}xN_{s2}$ =6x5). La valeur de R_{com} pour ce cas est égale à 74Ω.

En choisissant par exemple R2= 60Ω< Rcom, d'après la figure (V.1) , la densité de puissance qui lui est fournie notée Pfctb' par l'assemblage 2 est de 11.76W/cm^2 excédant celle du série Pfctb=9.83 W/cm^2,tandis que pour R1=140 Ω >R_{com}, la configuration série lui procure une densité de puissance de Pfcta=10.84W/cm^2 dépassant celle de la configuration 2 égale à notée Pfct a'=8.08 W/cm^2 .

R_{com} étant fonction de V_{com} et J_{com} est spécifique à des conditions de Po_2 et de température et des configurations considérées pour un nombre fixe de PACs.

4.Généralisation de notre méthode

Le but qu'on se propose d'atteindre à présent, est de dégager les instants de commutation indépendamment de l'équipement à alimenter. Ce faisant, cette méthode s'adaptera à n'importe quel récepteur.

La comparaison ne se fera pas par rapport à R_{com} puisque toute charge n'est pas impérativement résistive.

Les courbes pour ces différentes combinaisons pour un nombre de PAC=30 sont représentées par la figure (V.2).

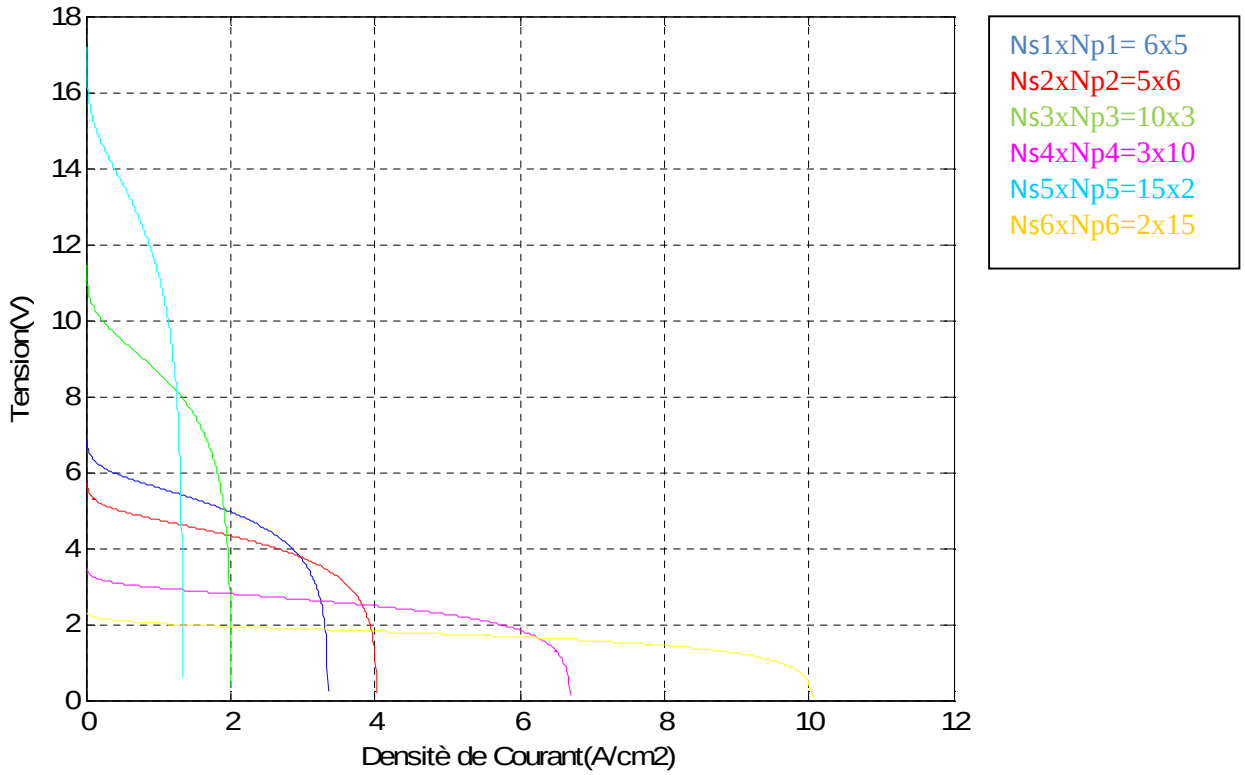


Figure V.2 :Variation de la tension pour toutes les configurations possibles Po2=1atm et T=40°C.

Pour éviter un nombre important de commutations, on a pris uniquement 2 configurations qui sont à titre d'exemple :Ns1xNp1= 6x5 ,Ns2xNp2=5x6.

Pour disposer du point de commutation , nous avons fixé la pression à 1 atm, et fait varier la température de 0 à 100 °C avec un pas de 10°C. La figure (V.3) montre les résultats obtenus.

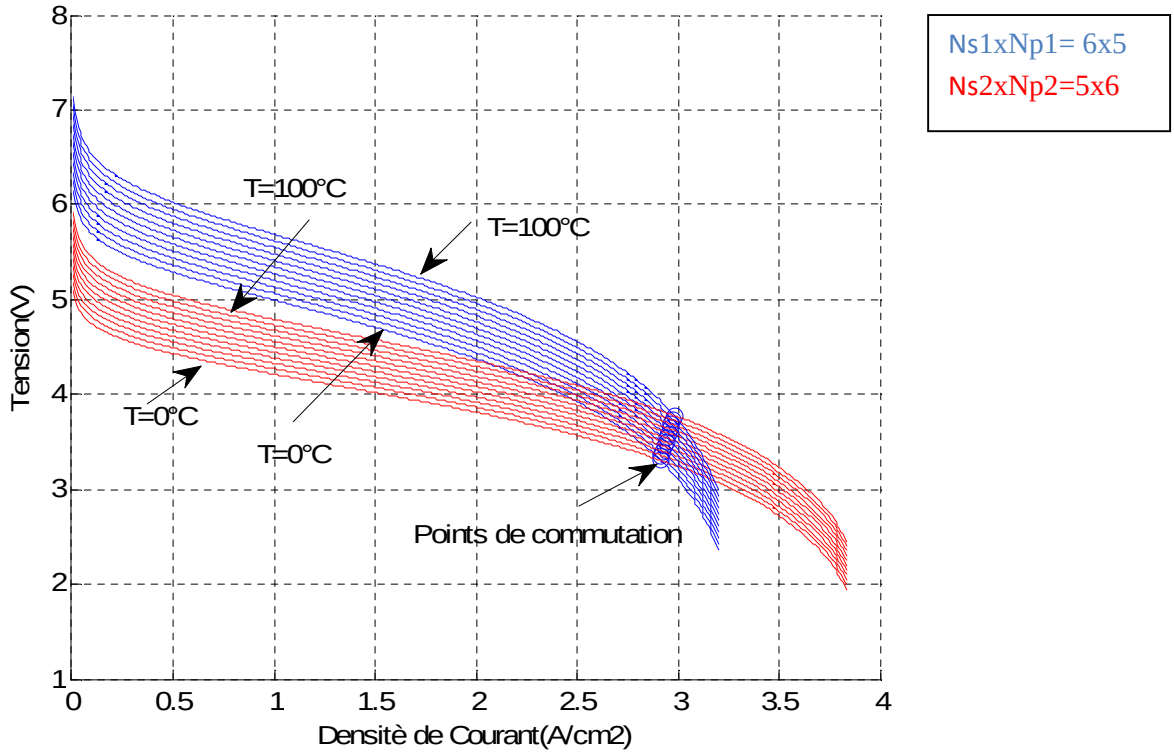


Figure V.3.a : Différentes caractéristiques pour les configurations prises pour différentes températures.

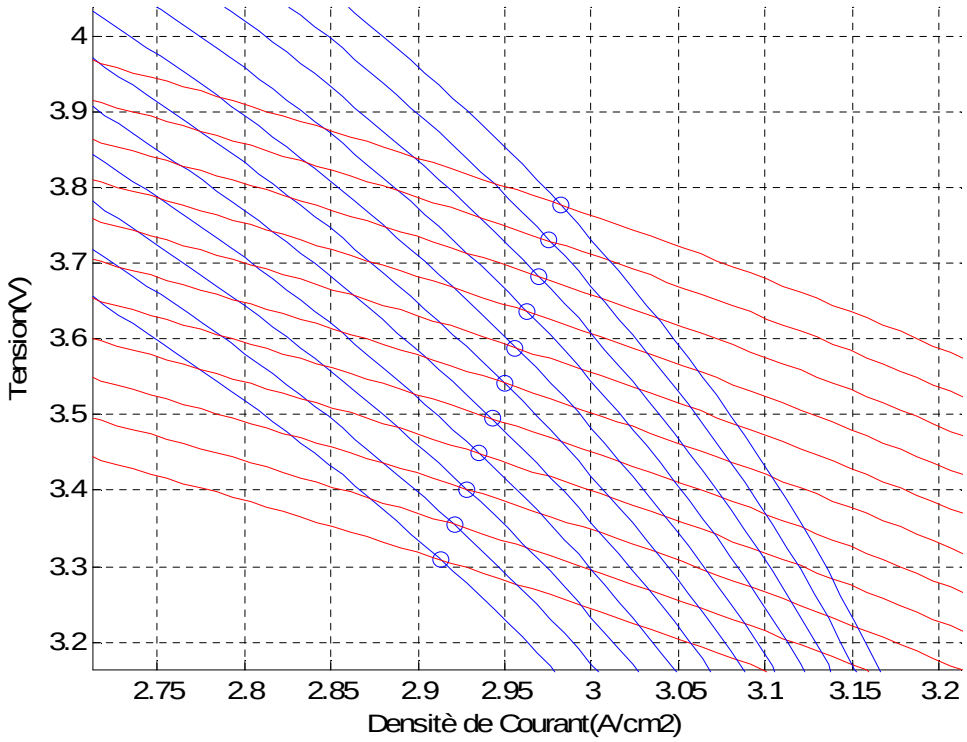


Figure V.3.b : Différentes caractéristiques pour les configurations prises pour différentes températures en zoom.

Pour calculer les points de commutation nous utilisons les équations suivantes pour des conditions de travail fixes.

$V_{config1}=N_{s1}*V_{PAC1}$. V.2

$J1=N_{p1}*J$. V.3

$V_{config2}=N_{s2}*V_{PAC2}$. V.4

$J2=N_{p2}*J$. V.5

$V_{config1}= V_{config2}$. V.6

Nous avons représenté en figure (V.4) et en figure (V.5) , la densité de courant de commutation Jcom et la tension de commutation Vcom selon T à P_{O2} constante.

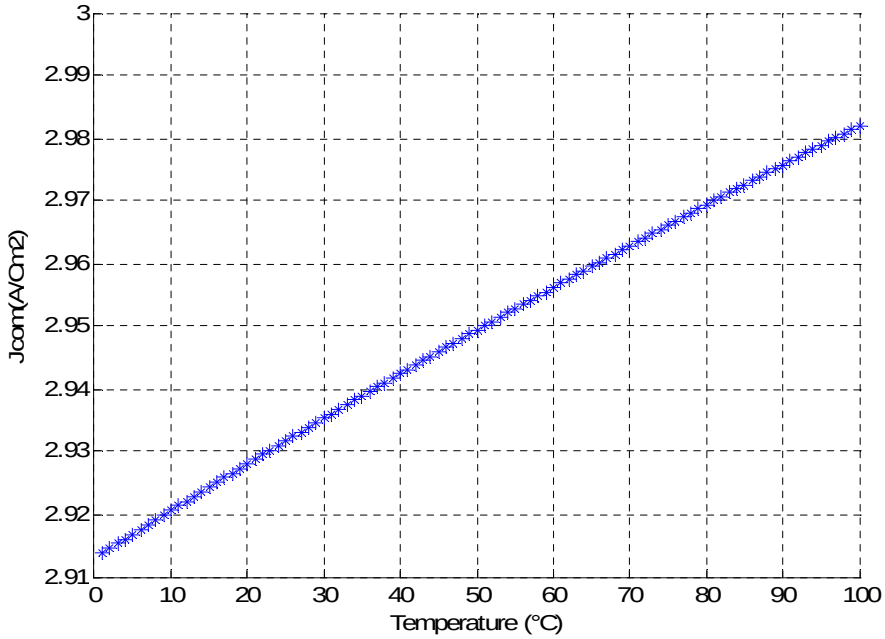


Figure V.4 :Variation de la densité de courant de commutation pour différentes températures.

Le calcul de Jcom répond à l'équation V.6.

La variation de Jcom selon T est linéaire comme constaté en figure V.4.

On peut écrire :Jcom=A.T ,A est une constante à déterminer V.7 .

Nous nous intéressons à présent à la variation de Vcom selon la température, une fois que Jcom est calculé.

Nous nous intéressons à présent à la variation de Vcom selon la température.

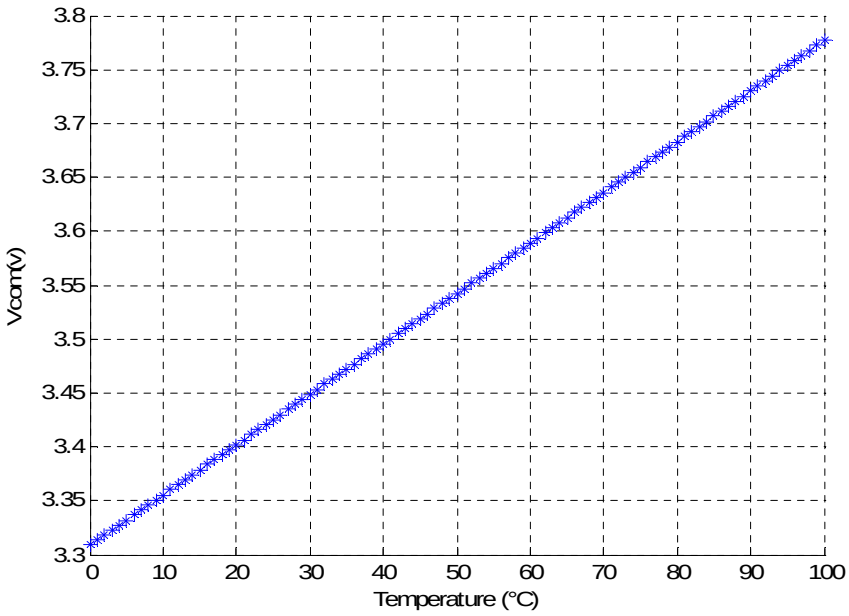


Figure V.5 :Variation de la tension de commutation pour différentes températures.

D'après la représentation obtenue en figure V.5, la variation de Vcom selon T est linéaire. On peut écrire :

Vcom=B.T, B une constante. V.8.

Les différents points de commutation sont calculés par l'équation (V.6).

La représentation de Vcom selon Jcom donne la figure V.6.

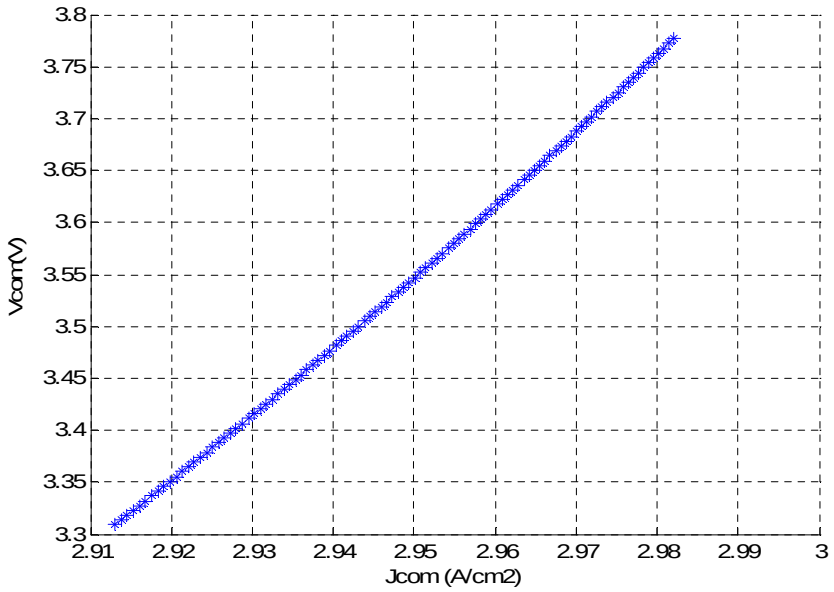


Figure V.6 : Variation de la tension de commutation en fonction de densité de courant de commutation pour différentes températures.

On définit la densité puissance de commutation par le produit de Vcom et Jcom selon :

$$P_{com} = V_{com} * J_{com} \qquad V.9$$

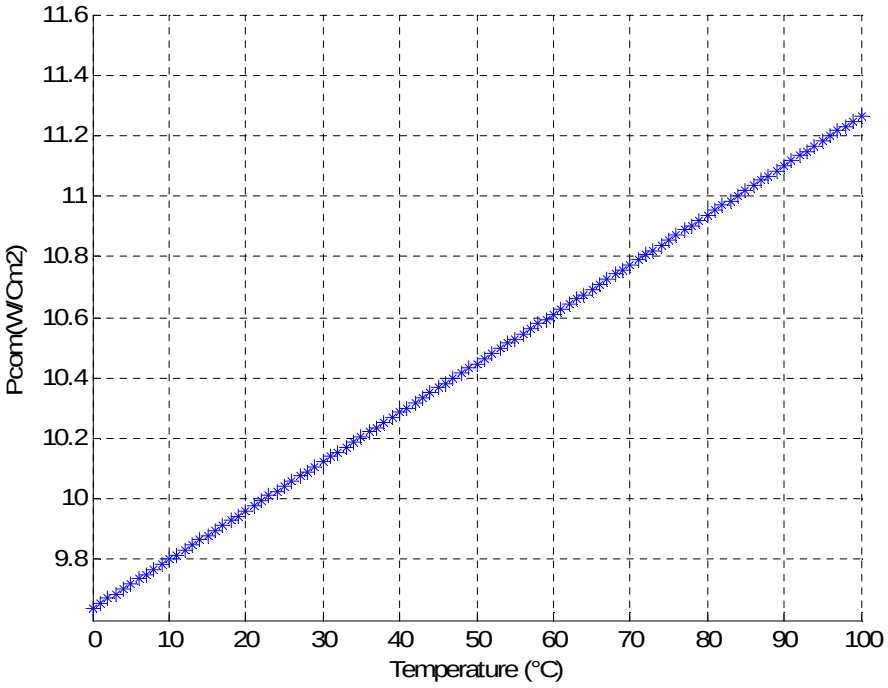


Figure V.7 : Variation de la densité de puissance de commutation pour différentes températures.

La densité de puissance de commutation est linéaire comme constaté en figure (V.7). Ces résultats sont valable pour P_{O2} =1atm et T variable.

Puisque la caractéristique du stack de PAC est dépendant de la pression aussi, à présent, nous avons fixé la température à 40°C , et avons fait varier la pression de 1 à 10 atm. La zone des points de commutation est représentée par la figure (V.8).

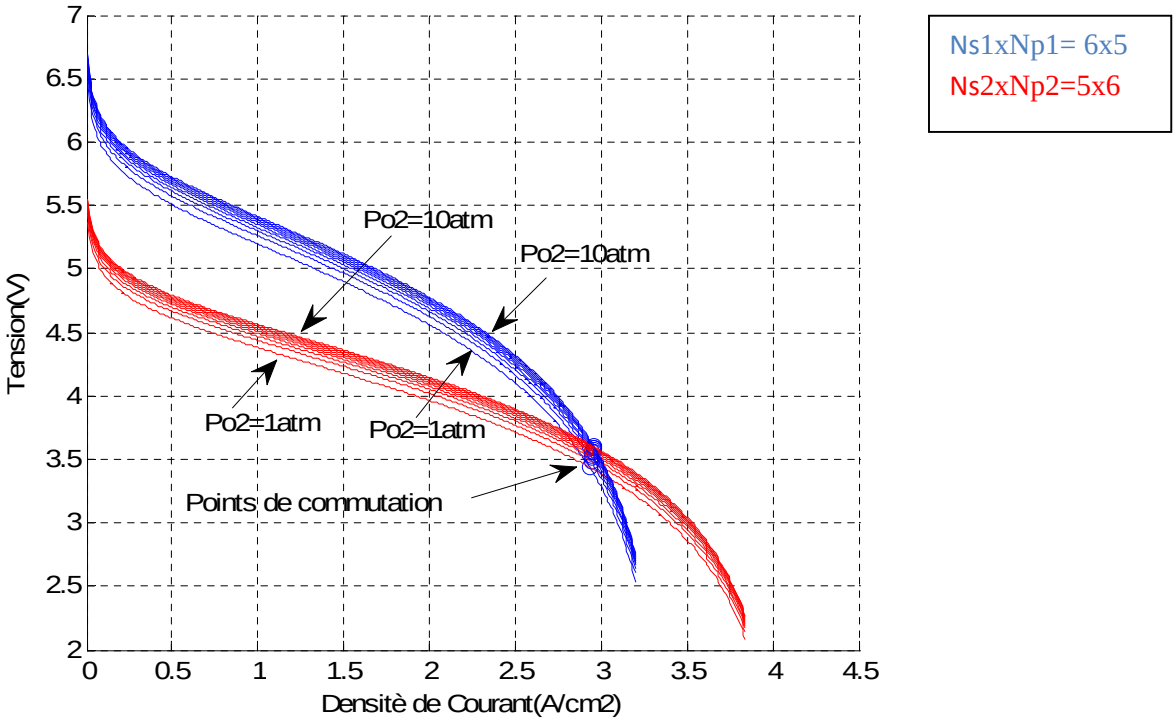


Figure V.8.a:Variation de la tension pour les deux configurations pour différentes pressions.

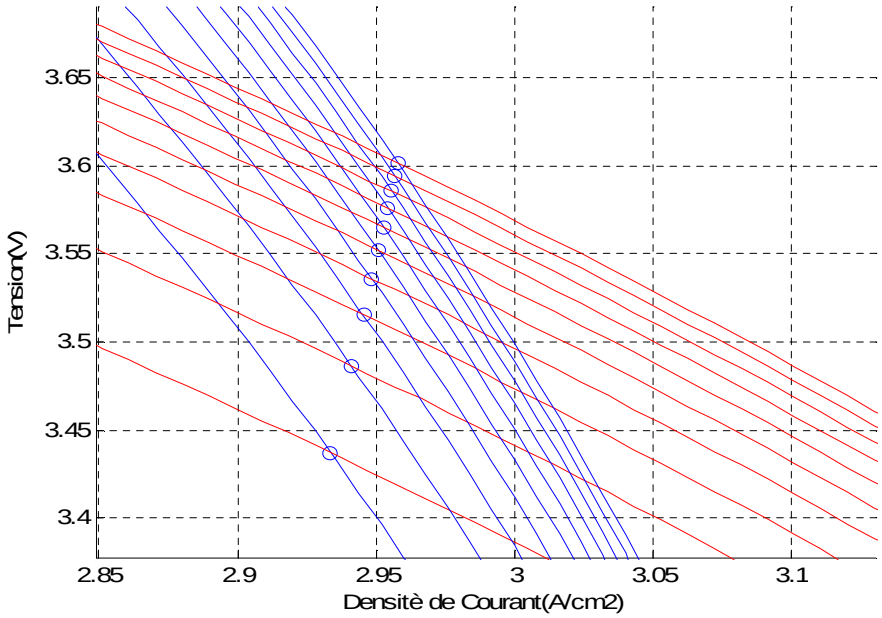


Figure V.8.b : Variation de la tension pour les deux configurations pour différentes pressions en zoom.

La variation de Vcom selon Jcom est donnée par la figure V.9.

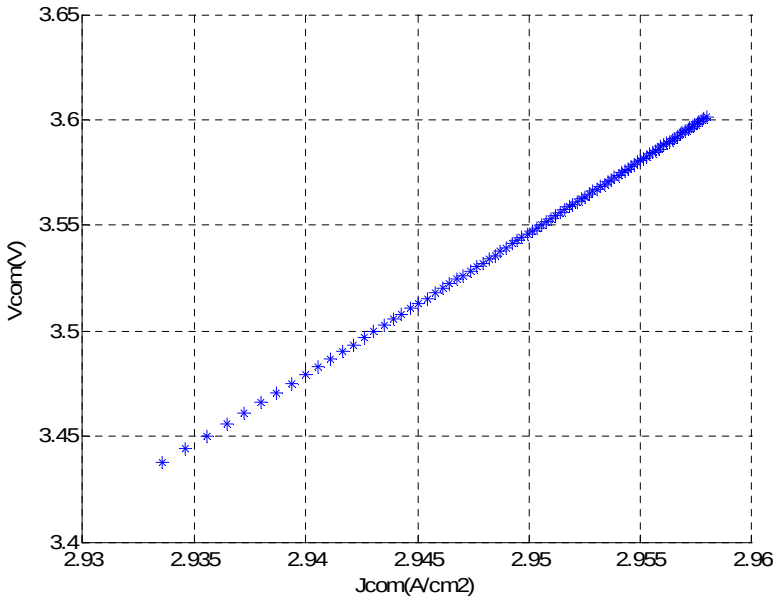


Figure V.9 :Variation de la tension de commutation en fonction de densité de courant de commutation pour différentes pressions.

A présent, on s'intéresse à l'allure de V_{com} ,J_{com} selon la pression. La variation de la densité de courant de commutation est représentée par la figure (V.10).

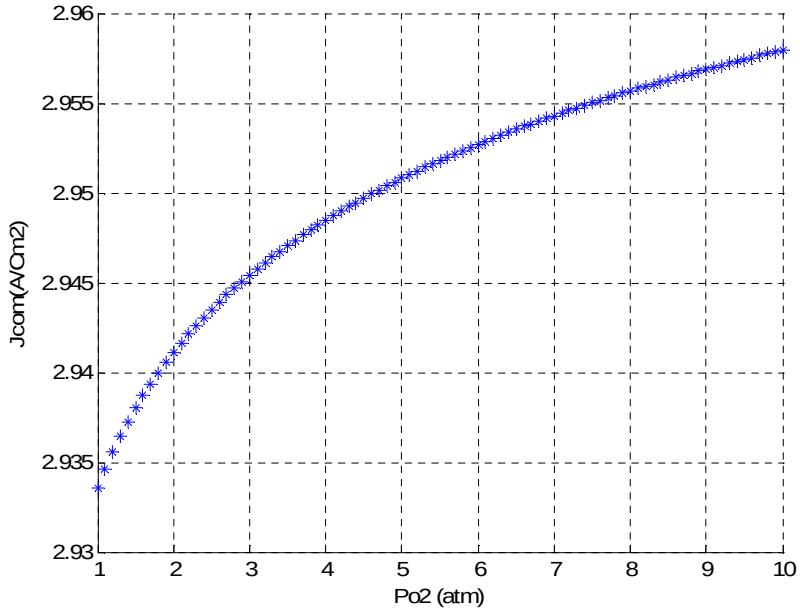


Figure V.10:Variation de la densité de courant de commutation pour différentes pressions.

On voit une variation non linéaire .On peut subdiviser en zones linéaires Où :

J_{com} =C.Po2 avec C une constante. V.10.

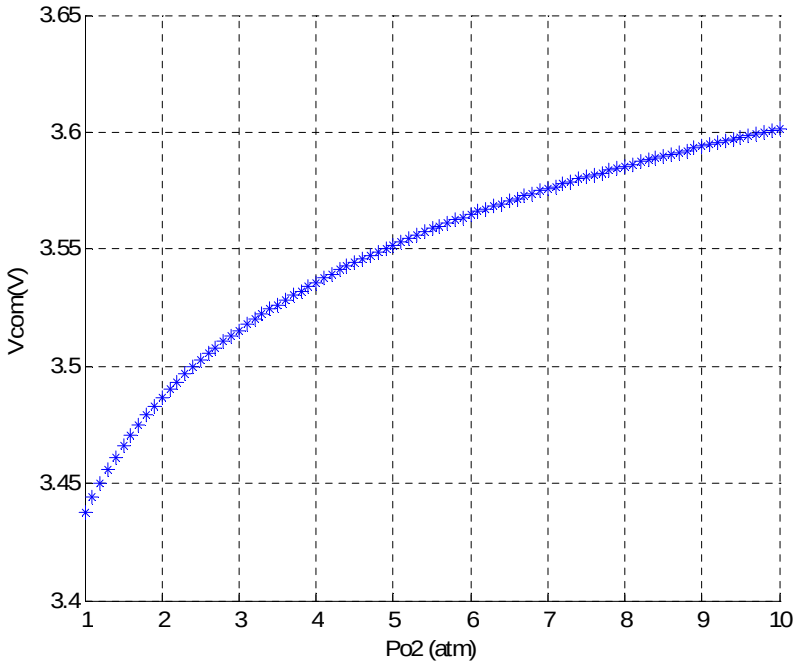


Figure V.11 :Variation de la tension de commutation pour différentes pressions.

La variation de Vcom selon la pression est représentée par la figure (V.11).

Elle est non linéaire .On peut diviser la courbe en zones linéaires Où :

Vcom=D.Po2, D une constante. V.11.

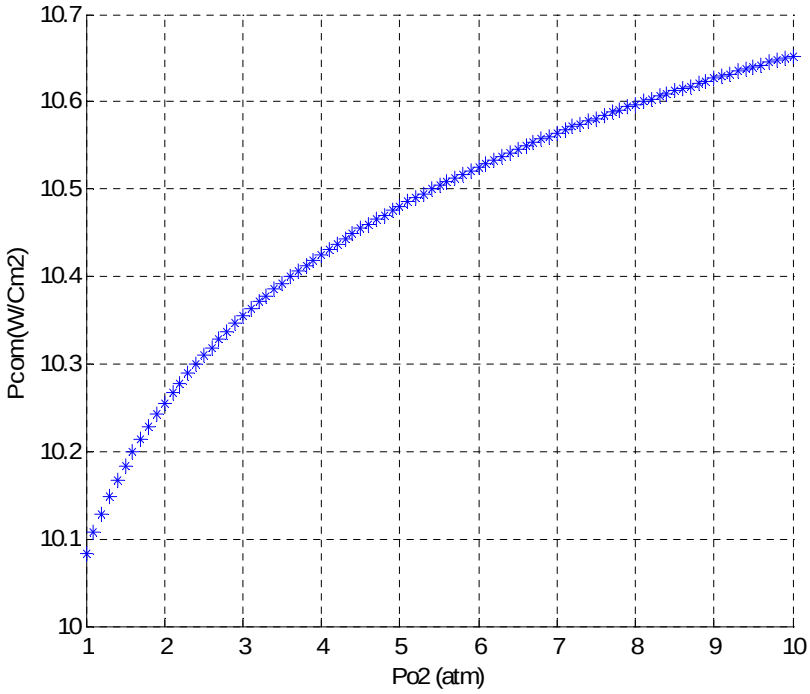


Figure V.12 :Variation de la densité de puissance de commutation pour différentes pressions.

Les allures de Vcom,Jcom selon la pression n'est pas linéaire .L'idée que nous proposons est d'établir des équations de Vcom=f(T,P) et de Jcom=f(T,P).Une comparaison des points de fonctionnement et celui de commutation permettra de commuter vers une configuration à une autre.

5. Conclusion

Cette technique que nous avons présentée vise à améliorer les performances de notre système alimentant une charge. La puissance de fonctionnement est d'abord tributaire de conditions de fonctionnement comme la pression, la température et d'autre part de la charge. Le travail présenté est basé sur la détermination de la configuration optimale du stack formé d'un nombre déterminé de PACs. L'objectif de ce travail est d'extraire la plus grande puissance du stack en connexion à une charge.

De très simples calculs permettent de décider, en temps réel, la meilleure configuration pour toute charge quelles que soient les conditions de travail. La non disponibilité de PACs au sein de notre laboratoire, ne nous a permis de concrétiser notre idée.

Bibliographie

[1]Zerhouni Fatima Zohra, «Développement et optimisation d'un générateur énergétique hybride propre à base de PV-PAC» **,** thèse de doctorat,USTOMB,2009.

Conclusion générale

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'étude et l'optimisation des systèmes énergétiques non polluants verts à base de pile à combustible à membrane échangeuse de proton candidat prometteur à la production d'énergie électrique, en réponse aux problèmes environnementaux mais aussi pour faire face à la question de l'indépendance énergétique inhérente à la croissance de la demande mondiale en énergie, et au besoin de chaines énergétiques.

Dans le chapitre 1, une part a été consacrée à la présentation du principe du fonctionnement de la pile à combustible, de ses différentes technologies ainsi que ses applications. De meilleurs connaissances et compréhension des mécanismes régissant le fonctionnement des PACs peuvent être acquises par l'analyse et la modélisation données dans le chapitre 2. Les piles à combustible ont par ailleurs des performances qui dépendent fortement des conditions de fonctionnement liées à l'environnement dans lequel elles se trouvent telles que la température, la pression.Une augmentation de la température est indispensable pour augmenter les performances, mais en même temps elle dessèche la membrane et si nous l'humidifions trop elle s'inonde et réduit les performances. Alors si nous augmentons la pression, nous obtenons un meilleur transfert de matière qui se traduit par une réduction des polarisations d'activation et de concentration mais si elle dépasse un certain seuil elle peut perforer la membrane, c'est pour cela qu'il faut trouver un meilleur compromis entre ses facteurs.

Dans le chapitre 3, on s'est intéressé au couplage direct PAC-charge d'après les exemples qu'on a étudiés et les résultats obtenus, l'application de cette méthode peut être rentable pour certaines charges et pas pour d'autres charges. Le chapitre 4 quand à lui nous permettra de voir pour un système à charges multiples s'il ya lieu de comparer la performance du système à source séparée avec celle à source commune. L'intérêt est fondé sur la maximisation du rendement de notre système pour une meilleure exploitation de la pile à combustible. Une méthode de changement de configuration à été proposée dans le chapitre 5 afin d'améliorer les performances du système.

L'utilisation actuelle des PACs n'est pas sans inconvénient. En effet, comme pour toute technologie qui n'est pas encore totalement maîtrisée, divers aspects techniques limitent son développement.

Il est à signaler également que les PACs ont besoin de certains auxiliaires pour garantir un fonctionnement correct. Dans la plupart des cas, ces auxiliaires telle l'interface électrique, sont également l'objet de recherche et d'améliorations. Cependant, l'aspect le plus contraignant d'une PAC reste toujours son coût économique élevé.

Par ce présent travail, nous avons proposé des idées pour garantir une bonne exploitation de la PAC. Une vérification pratique de nos propositions s'avère nécessaire une fois que nous disposerons au niveau de notre laboratoire de stack de PAC.

Nous avons comme perspectives

-La modélisation dynamique de la pile à combustible par la spectroscopie d’impédance.

-La modélisation thermique.

-Réalisation expérimentale de la méthode du changement de configuration.

Nomenclature

PEMFC	Proton exchange membrane fuel cell
PAC	Pile à combustible
H	Enthalpie
G	Energie libre de Gibbs
T	Température d'une cellule
S	Entropie
ΔG	Variation d'énergie libre de Gibbs
ΔH	Variation d'enthalpie
F	Constante de Farraday
η	Rendement d'un processus de transformation d'énergie
H_2O_{vap}	Eau vapeur
H_2O_{liq}	Eau liquide
H_2	Hydrogène
O_2	Oxygène
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
PCS	Pouvoir calorifique supérieur
η_{mat}	Rendement en matière
η_{tens}	Rendement en tension
$\eta_{énergie}$	Rendement ènergetique
Fgaz	Flux de gaz
η_c	Nombre de cellules
ηF	Rendement faradique
n	Nombre de moles
$\dot{n}_{H_2O}$	Production d'eau
P_{brute}	Puissance brute
$\overline{M}_{H_2O}$	Masse molaire de l'eau
V	Tension de la pile
I	Courant de la pile
J	Densité de Courant de la pile
Vs	Tension d'un stack
Ns1	Nombre de cellules série pour la configuration 1
Np1	Nombre de cellules parallèle pour la configuration 1
Ns2	Nombre de cellules série pour la configuration 2
Np2	Nombre de cellules parallèle pour la configuration 2
Icom	Courant de commutation
Vcom	Tension de commutation
Pcom	Puissance de commutation
Pfcta	Puissance de fonctionnement au point a
Pfcta'	Puissance de fonctionnement au point a'
Pfctb	Puissance de fonctionnement au point b
Pfctb'	Puissance de fonctionnement au point b'
R1	Charge1
R2	Charge2