

## 9. Rentabilité de l'énergie éolienne

### 9.3 Indicateurs économiques



Hussein Ibrahim, Ph.D. - Antoine Brégaint, M.Sc.A.

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Retour simple sur investissement
- Valeur actuelle
- Effet de l'inflation
- Valeur actualisée nette
- Coût sur le cycle de vie actualisé
- Taux de rendement interne
- Coût actualisé de l'énergie
- Conclusion

# Plan de cette présentation

- ***Introduction et objectifs***
- Retour simple sur investissement
- Valeur actuelle
- Effet de l'inflation
- Valeur actualisée nette
- Coût sur le cycle de vie actualisé
- Taux de rendement interne
- Coût actualisé de l'énergie
- Conclusion

# Introduction et objectifs

- Les projets éoliens sont coûteux et nécessitent des investissements de grande ampleur. Il est donc essentiel de réaliser une analyse économique avant de débiter un projet.
- Cette façon de faire permet également de comparer des projets entre eux.
- Pour ce faire, de nombreux indicateurs économiques existent et sont présentés dans cette partie.
- La liste des indicateurs n'est pas exhaustive mais permet une première initiation à l'analyse économique des systèmes énergétiques.

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- ***Retour simple sur investissement***
- Valeur actuelle
- Effet de l'inflation
- Valeur actualisée nette
- Coût sur le cycle de vie actualisé
- Taux de rendement interne
- Coût actualisé de l'énergie
- Conclusion

# Retour simple sur investissement (RSI)

- C'est la façon la plus facile d'estimer la rentabilité d'un projet énergétique.
- Il indique le nombre d'années nécessaires avant d'obtenir un retour sur investissement :

$$RSI = \frac{\text{coût du projet}}{\text{gains annuel}} \quad (1)$$

- Ce type d'indicateur permet seulement de savoir à vue d'œil si le projet est viable ou non. Une étude plus poussée est ensuite nécessaire.

# Exercice 1 :

- Un client a une facture d'électricité totale de 2 000\$/an.
- L'utilisation d'une éolienne domestique lui permettrait de réduire de moitié cette facture.
- Le client souhaite une période de retour sur investissement maximale de 5 ans.
- **Quel est le budget maximal pour l'installation de cette éolienne ?**

# Solution 1 :

- Économies par an :  $0,5 * 2\ 000\ \$ = 1\ 000\ \$$
- Budget maximal :  $1\ 000\ \$/\text{an} * 5\ \text{ans} = \mathbf{5\ 000\ \$}$
- Si le coût du projet est supérieur à 5 000\$, le client ne choisira pas ce nouveau système de production d'électricité.

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Retour simple sur investissement
- ***Valeur actuelle***
- Effet de l'inflation
- Valeur actualisée nette
- Coût sur le cycle de vie actualisé
- Taux de rendement interne
- Coût actualisé de l'énergie
- Conclusion

# Valeur actuelle (VA)

- Dans une étude économique, il est important de connaître les différents flux financiers (coûts et revenus). Ces derniers ont été étudiés dans la présentation précédente.
- Il faut ensuite ramener ces flux à la valeur qu'ils auraient aujourd'hui (valeur actuelle  $Va$ ) :

$$Va = \frac{A}{(1+t)^N} \quad (2)$$

$A$  : Montant futur

$N$  : Nombre d'années

$t$  : taux d'actualisation (dépend de la dépréciation de l'argent lors des  $N$  années)

# Valeur actuelle (VA)

- Si le montant A est à payer tous les ans pendant N années, la valeur actuelle devient :

$$Va = A \left( \frac{1}{(1+t)^N} + \frac{1}{(1+t)^{N-1}} + \dots \right) = A \sum_{p=1}^N \frac{1}{(1+t)^p} = \frac{A}{t} \left[ 1 - \left( \frac{1}{1+t} \right)^N \right] \quad (3)$$

- Le facteur de valeur actualisée (FVA) est le rapport entre le montant actuel et celui à payer chaque année :

$$FVA = \frac{Va}{A} = \frac{1}{t} \left[ 1 - \left( \frac{1}{1+t} \right)^N \right] \quad (4)$$

# Valeur actuelle (VA)

- Sur le même principe, on peut déterminer le montant à payer lors de chaque période ( $M$ ) afin de rembourser un prêt initial ( $Va$ ) avec un taux d'intérêt  $int$  :

$$M = \frac{Va}{FVA} = \frac{M_i}{\frac{1}{int} \left[ 1 - \left( \frac{1}{1+int} \right)^N \right]} \quad (5)$$

$M_i$  : Capital initial placé à un taux d'intérêt  $int$

## Exercice 2 :

- Un emprunt de 100 000\$ sur 15 ans est réalisé à un taux de 5% par année. Le taux d'actualisation utilisé est de 4%.
- **Quel est le montant à verser annuellement pour rembourser cet emprunt ?**
- **Quelle est la valeur actuelle de cet emprunt à l'année 10 ?**

## Solution 2 :

- Pour calculer les paiements annuels, la formule (5) est utilisée :

$$M = \frac{M_i}{\frac{1}{int} \left[ 1 - \left( \frac{1}{1 + int} \right)^N \right]} = \frac{100\,000}{0,05 \left[ 1 - \left( \frac{1}{(1 + 0,05)} \right)^{15} \right]} = 9\,634\$$$

- Pour rembourser cet emprunt en 15 ans, le client devra régler annuellement **9 634\$**.

## Solution 2 :

- Pour connaître la valeur actuelle de l'emprunt effectuée à l'année 10, la formule (2) est utilisée :

$$V_a = \frac{A}{(1 + t)^N} = \frac{9\,634}{(1 + 0,04)^{10}} = 6\,508\$$$

- Le montant versé dans dix ans pour rembourser l'emprunt correspond à **6 508\$** aujourd'hui.

## Exercice 3 :

- Un emprunt de 100 000\$ sur 3 ans est réalisé à un taux de 5% par année.
- **En supposant un taux d'actualisation de 6%, quelle est la valeur actualisée des paiements d'intérêt de ces 3 années ?**

## Solution 3 :

- De la même façon que pour l'exercice 2, on détermine les versements annuels à réaliser pour rembourser le prêt :

$$M = \frac{M_i}{\frac{1}{int} \left[ 1 - \left( \frac{1}{1 + int} \right)^N \right]} = \frac{100\ 000}{\frac{1}{0,05} \left[ 1 - \left( \frac{1}{(1 + 0,05)} \right)^3 \right]} = 36\ 721\$$$

# Solution 3 :

- Pour l'année 1 :

- Intérêt :  $100\ 000 * 0,05 = 5\ 000\$$
- Capital :  $36\ 721 - 5\ 000 = 31\ 721\$$
- Reste à payer :  $100\ 000 - 31\ 721 = 68\ 279 \$$
- Valeur actualisée des intérêts de la première année :

$$Va = \frac{A}{(1 + t)^N} = \frac{5\ 000}{(1 + 0,06)^1} = 4\ 717\$$$

- On réitère le même raisonnement pour les deux autres années.

## Solution 3 :

Année	Intérêt (\$)	Capital (\$)	Reste à payer (\$)	Valeur actualisée des intérêts (\$)
0			100 000	
1	5 000	31 721	68 279	4 717
2	3 414	33 307	34 972	3 038
3	1 749	34 972	0	1 468
	Total des valeurs actualisées des intérêts (\$)			9 224

- La valeur actualisée des intérêts pour ces trois années est donc de **9 224\$**.

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Retour simple sur investissement
- Valeur actuelle
- ***Effet de l'inflation***
- Valeur actualisée nette
- Coût sur le cycle de vie actualisé
- Taux de rendement interne
- Coût actualisé de l'énergie
- Conclusion

# Effet de l'inflation

- Il est possible que le montant futur que l'on ait à payer aujourd'hui ( $A$ ) augmente dans les prochaines années en raison de l'inflation. Cela peut notamment être le cas pour les coûts annuels de l'énergie.
- Dans ce cas, il faut tenir compte de cette inflation ( $i$ ) pour les différents calculs :

$$A' = A(1 + inf)^{N-1} \quad (6)$$

$$Va' = A \frac{(1+inf)^{N-1}}{(1+t)^N} \quad (7)$$

# Effet de l'inflation

- Le calcul du facteur de valeur actualisée est donc lui aussi impacté :

$$FVA = \sum_{p=1}^N \left( \frac{(1 + inf)^{p-1}}{(1 + t)^p} \right)$$
$$= \begin{cases} \frac{1}{t - inf} \left[ 1 - \left( \frac{1 + inf}{1 + t} \right)^N \right] & \text{si } inf \neq t \\ \frac{N}{1 + t} & \text{si } inf = t \end{cases} \quad (8)$$

## Exercice 4 :

- L'installation d'une éolienne permet d'économiser 1 000 L de diesel par an. Le litre de diesel a un coût de 1,35\$.
- **En supposant une inflation du coût du diesel de 4% et un taux d'actualisation de 6%, quelle sont les économies effectuées après 10 années d'utilisation ?**

# Solution 4 :

- L'éolienne permet d'économiser chaque année  $1\ 000 * 1,35 = 1\ 350\$$ .
- En utilisant l'équation (8), on est capable d'estimer l'économie effectuée après dix années d'utilisation :

$$FVA = \frac{Va'}{A} = \frac{1}{t - inf} \left[ 1 - \left( \frac{1 + inf}{1 + t} \right)^N \right]$$

$$Va' = 1\ 350 * \frac{1}{0,06 - 0,04} \left[ 1 - \left( \frac{1 + 0,04}{1 + 0,06} \right)^{10} \right] = 11\ 707\$$$

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Retour simple sur investissement
- Valeur actuelle
- Effet de l'inflation
- ***Valeur actualisée nette***
- Coût sur le cycle de vie actualisé
- Taux de rendement interne
- Coût actualisé de l'énergie
- Conclusion

# Valeur actualisé nette (VAN)

- C'est l'indicateur clé d'une étude économique. La VAN doit être positive à la fin du projet pour que ce dernier soit rentable.
- Il correspond à la somme de tous les flux financiers actualisés ainsi que de la valeur résiduelle actualisée à laquelle on soustrait l'investissement initial :

$$VAN = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^M Va_{k,j} - I + Vr \quad (9)$$

$I$  : L'investissement initial

$N$  : Le nombre d'années

$M$  : Le nombre de flux financiers à prendre en compte

$Vr$  : La valeur résiduelle (à la fin du projet) actualisée

## Exercice 5 :

- On suppose que la facture électrique (coût actualisé) d'un particulier s'élèvera dans les 3 prochaines années à : 2 000\$, 1 750\$ et 1 500\$.
- En installant une éolienne dont le coût s'élève à 10 000\$, il a la possibilité de baisser ces trois prochaines factures (coût actualisé) à 1000\$, 750\$ et 500\$.
- **En supposant une valeur résiduelle nulle, le client doit-il acheter cette éolienne si on fait l'analyse de cycle de vie pour ces trois années ?**

## Solution 5 :

- En reprenant l'expression de la valeur actualisée nette (9), il vient :

$$VAN = (2000 - 1000)\$ + (1750 - 750)\$ + (1500 - 500)\$ - 10\,000 + 0$$

$$VAN = -7000\$$$

- La valeur actualisée nette du projet étant négative, ce dernier n'est pas rentable.

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Retour simple sur investissement
- Valeur actuelle
- Effet de l'inflation
- Valeur actualisée nette
- ***Coût sur le cycle de vie actualisé***
- Taux de rendement interne
- Coût actualisé de l'énergie
- Conclusion

# Coût sur le cycle de vie actualisé (CCV)

- Il indique les coûts actualisés durant le cycle de vie.

$$CCV = I + \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{C_{k,j}(1+i)^{k-1}}{(1+t)^k} \quad (10)$$

$C$  : Coûts d'opération

- L'utilisation de cet indicateur permet de comparer plusieurs projets entre eux.

# Exercice 6 :

- **Reprendre la question 5 et faire l'analyse en terme de cycle de vie.**

## Solution 6 :

- La formule sur le coût du cycle de vie actualisé (10) donne :

$$CCV = I + \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{C_{k,j} (1+i)^{k-1}}{(1+t)^k}$$

$$CCV1 = 2000 + 1750 + 1500 = 5250\$$$

$$CCV2 = 10000 + 1000 + 750 + 500 = 12250\$$$

$$CCV1 - CCV2 = -7000\$$$

- L'économie de coût de cycle de vie étant négative, le projet n'est pas un bon choix.

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Retour simple sur investissement
- Valeur actuelle
- Effet de l'inflation
- Valeur actualisée nette
- Coût sur le cycle de vie actualisé
- ***Taux de rendement interne***
- Coût actualisé de l'énergie
- Conclusion

# Taux de rendement interne (TRI)

- Il correspond au taux d'actualisation donnant une valeur actualisée nette (VAN) nulle.
- Plus cet indicateur est élevé et plus le projet est économiquement intéressant.
- Au moment de l'investissement, c'est cette valeur de la TRI qui permet d'indiquer si l'investissement est intéressant.
- En deçà d'une certaine valeur, il peut être risqué d'investir.

# Exercice 7 :

- La facture d'électricité d'un client s'élève à 2 200\$ par année.
- La mise en place d'une éolienne domestique de 7 500\$ fait économiser chaque année 50 % des coûts d'électricité.
- Cette éolienne est financée à hauteur de 80 % sur 5 ans à un taux d'intérêt de 4 %.
- Les coûts de l'électricité vont augmenter de 7 % par année.
- L'éolienne doit être assurée (70\$ par année) avec une augmentation estimée de 4 % par année.
- Le remplacement de pièces de l'éolienne semble obligatoire la 5<sup>ème</sup> année (150\$) (inflation de 6% à prendre en compte).
- **En supposant une valeur résiduelle nulle, quelle sera la VAN après 10 ans pour un taux d'actualisation de 8 % ?**

# Solution 7 :

- Flux négatifs :

- Paiement initial :  $7\,500 * 0,2 = 1\,500\$$

- Paiement annuel :  $\frac{6\,000}{\left(\frac{1}{0,04}\right) * \left(1 - \left(\frac{1}{1+0,04}\right)^5\right)} = 1\,348\$$

- Assurance : 70\$ par année

- Maintenance : 150\$ la cinquième année

- Flux positifs :

- Économies :  $2\,200 * 0,5 = 1\,100\$$  par année

# Solution 7 :

- Calcul de la VAN (formule (9)) :

$$\begin{aligned} VAN = & -1\,500 - 1\,347 * \left( \frac{1}{0,08} \right) * \left( 1 - \left( \frac{1}{1 + 0,08} \right)^5 \right) - \\ & 70 * \frac{1}{0,08 - 0,04} \left[ 1 - \left( \frac{1 + 0,04}{1 + 0,08} \right)^{10} \right] - 150 * \frac{(1 + 0,06)^{5-1}}{(1 + 0,08)^5} + \\ & 1100 * \frac{1}{0,08 - 0,07} \left[ 1 - \left( \frac{1 + 0,07}{1 + 0,08} \right)^{10} \right] \end{aligned}$$

$$VAN = 2\,211\$$$

- Avec une VAN positive, le projet est jugé économiquement rentable.

# Solution 7 :

- Ici, le taux d'actualisation utilisé est de 8%.
- Il pourrait être intéressant de déterminer le taux d'actualisation donnant une valeur actualisée nulle, aussi appelé TRI.
- Ce dernier se détermine grâce à des outils informatiques (fonction python par exemple) sans quoi le travail est long est fastidieux.
- Le TRI de cet exemple est d'environ 18,5%. Cela signifie que passé ce taux d'actualisation, le projet ne sera plus économiquement rentable.

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Retour simple sur investissement
- Valeur actuelle
- Effet de l'inflation
- Valeur actualisée nette
- Coût sur le cycle de vie actualisé
- Taux de rendement interne
- ***Coût actualisé de l'énergie***
- Conclusion

# Coût actualisé de l'énergie (LCOE)

- En anglais « *Levelized Cost of Energy* », il représente le rendement économique du projet et motive le choix d'une technologie par rapport à une autre.
- Il s'agit du coût de l'énergie (\$ par unité de production) lorsque la VAN est nulle. Il se rapproche donc du taux de rendement interne (TRI).
- En d'autres termes, il s'agit du coût moyen de l'énergie (\$/MWh...) sur la durée de vie du projet apportant l'équilibre financier de ce dernier.

# Coût actualisé de l'énergie (LCOE)

- La formule générique du LCOE est la suivante :

$$LCOE = \frac{\sum_{p=1}^N \frac{M_p + Ex_p}{(1+t)^p}}{\sum_{p=1}^N \frac{Q_p}{(1+t)^p}} \quad (11)$$

$M_p$  : Coût d'investissement engagés lors de l'année p

$Ex_p$  : Coût d'exploitation engagés lors de l'année p

$Q_p$  : La production totale au cours de l'année p

# Coût actualisé de l'énergie (LCOE)

- La formule simplifiée du LCOE tient compte des hypothèses suivantes :
  - Les coûts d'investissement sont engagés au cours de l'année zéro.
  - La production annuelle  $Q_p$  est constante chaque année ( $Q$ ).
  - Les coûts d'exploitation  $Ex_p$  sont constants chaque année ( $Ex$ ).
- Dans ce cas, le LCOE s'écrit comme la somme de deux termes :
  - Le coût fixe nivelé (LFC, Levelized Fixed Cost), qui calcule le paiement moyen requis pour «amortir» ou rembourser les coûts en capital sur N années.
  - Le coût variable nivelé (LVC, Levelized Variable Cost), qui calcule le paiement moyen requis pour couvrir les coûts d'exploitation unitaires.

# Coût actualisé de l'énergie (LCOE)

- Si les coûts d'exploitation  $E$  (carburant, main-d'œuvre, maintenance...) ne changent pas, le LVC est égal au coût variable total par unité de production :

$$LVC = \frac{Ex}{Q} \quad (12)$$

- Toujours en supposant que les coûts en capital sont payés en une seule somme  $TIC$  au début du projet :

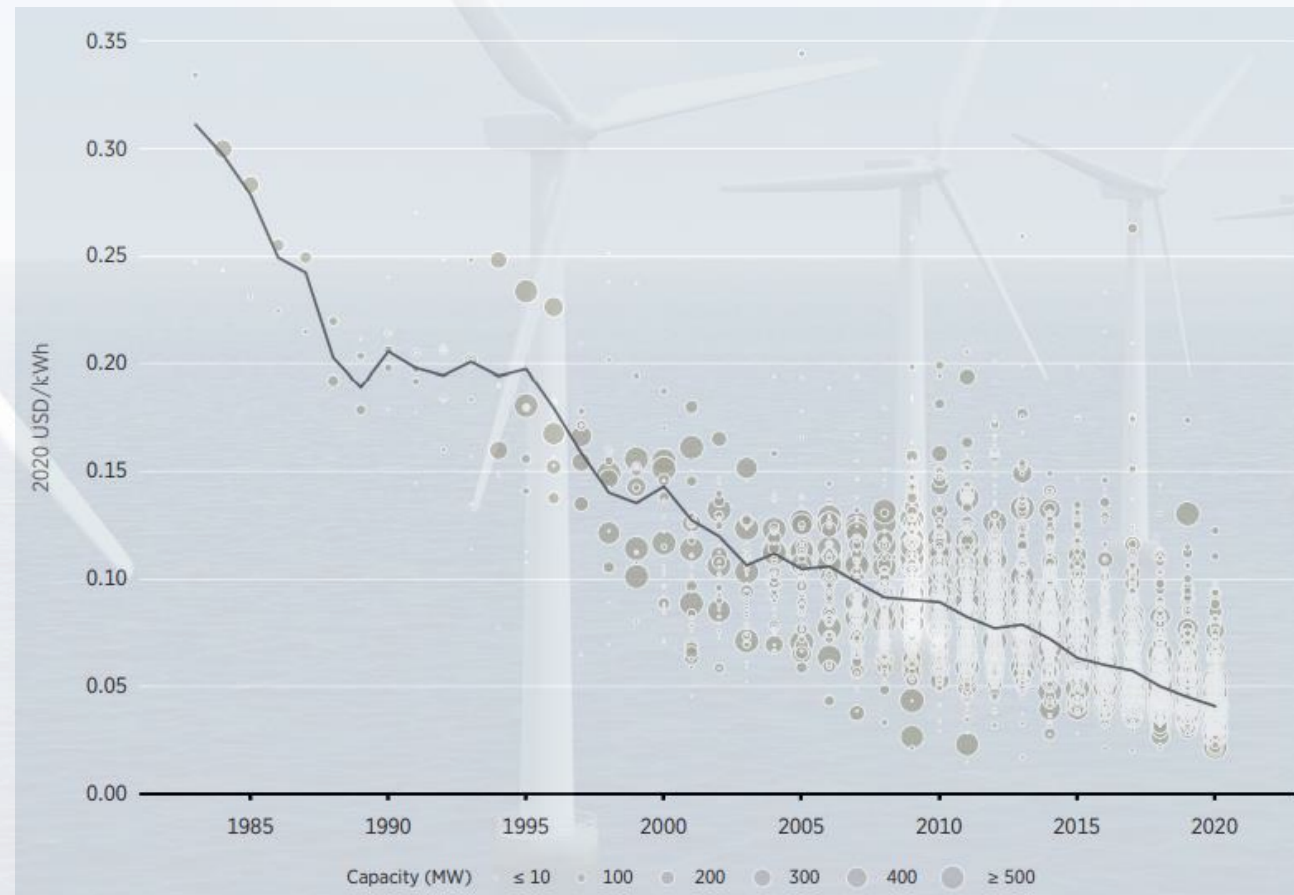
$$LFC = \frac{TIC * t}{Q * [1 - (1 + t)^{-N}]} \quad (13)$$

- La formule simplifiée du LCOE devient donc :

$$LCOE = LFC + LVC = \frac{TIC * t}{Q * [1 - (1 + t)^{-N}]} + \frac{Ex}{Q} \quad (14)$$

# Coût actualisé de l'énergie (LCOE)

- Le LCOE des projets éoliens terrestres est en constante décroissance depuis plus de 30 ans et est aujourd'hui d'environ 40 \$/MWh.



# Exercice 8 :

- Une centrale éolienne coûte 10 millions de dollars à construire et à une durée de vie prévue de 20 ans.
- Le coût d'exploitation d'un MWh d'électricité est de 5\$.
- La centrale a une capacité de 10 MW.
- La centrale est prévue pour avoir un facteur de charge de 25%.
- Le taux d'actualisation est estimé à 10 %.
- **Quel est le coût nivelé de l'énergie éolienne ? (Utilisez la formule simplifiée)**

# Solution 8 :

- Il faut commencer par déterminer la production annuelle :

$$Q = 365 \left[ \frac{j}{an} \right] * 24 \left[ \frac{hr}{j} \right] * 10 [MW] * 0,25 = 21\,900 \text{ MWh}$$

- Pour appliquer la formule simplifiée, on suppose que :

- La production Q est constante chaque année
- Les coûts variables LVC sont constants
- Le capital est dépensé à l'an 0 (TIC = 10 millions de \$)

$$LCOE = \frac{TIC * t}{Q * [1 - (1 + t)^{-N}]} + LVC$$

$$LCOE = \frac{10\,000\,000 * 0,10}{21\,900 * [1 - (1 + 0,10)^{-20}]} + 5$$

$$LCOE = 54 \frac{\$}{MWh} + 5 \frac{\$}{MWh} = 59 \frac{\$}{MWh}$$

# Plan de cette présentation

- Introduction et objectifs
- Retour simple sur investissement
- Valeur actuelle
- Effet de l'inflation
- Valeur actualisée nette
- Coût sur le cycle de vie actualisé
- Taux de rendement interne
- Coût actualisé de l'énergie
- **Conclusion**

# Conclusion

- À l'aide de ces indicateurs économiques, il est possible de réaliser des études préprojet pour juger de la rentabilité économique de ce dernier.
- Les résultats obtenus ne doivent pas seulement être interprétés tels quels mais comparer à ceux obtenus pour d'autres projets.
- Chaque projet est unique et mérite une analyse économique poussée pour éviter tout risque financier.

**MERCI POUR VOTRE ATTENTION !**



# MERCI



## Questions ?

Hussein IBRAHIM, Ph.D  
Tél: 418-962-9848 # 340  
[cc-hussein.ibrahim@etsmtl.ca](mailto:cc-hussein.ibrahim@etsmtl.ca)  
[Hussein\\_ibrahim01@uqar.ca](mailto:Hussein_ibrahim01@uqar.ca)  
[Hussein.ibrahim@itmi.ca](mailto:Hussein.ibrahim@itmi.ca)