



**POLYTECHNIQUE  
MONTRÉAL**

UNIVERSITÉ  
D'INGÉNIERIE

## Plan de cours

### **ELE8453 - Méthodes d'optimisation & d'apprentissage pour les réseaux électriques**

Département de génie électrique

Hiver 2024

3 crédits

Triplet horaire : 3 - 1 - 5

[moodle.polymtl.ca](http://moodle.polymtl.ca)

## Professeur et responsable du cours

Nom	<b>Antoine Lesage-Landry</b>
Titre	Professeur adjoint, ing., Ph.D.
Bureau	M-5111
Téléphone	(514) 340-4711 – Poste 2442
Courriel	<a href="mailto:antoine.lesage-landry@polymtl.ca">antoine.lesage-landry@polymtl.ca</a>
Disponibilité	sur rendez-vous

## Chargé de travaux pratiques et répétiteur

Nom	<b>Julien Pallage</b>
Rôle	Chargé de laboratoire
Courriel	<a href="mailto:julien.pallage@polymtl.ca">julien.pallage@polymtl.ca</a>
Disponibilité	sur rendez-vous
Nom	<b>Abraham Kouamé N'Zi</b>
Rôle	Répétiteur
Courriel	<a href="mailto:kouame.nzi@polymtl.ca">kouame.nzi@polymtl.ca</a>

## Description du cours

Ce cours fait partie du programme de l'IGEE sous le sigle IGEE419.

Introduction aux méthodes d'optimisation et d'apprentissage pour la gestion, l'opération et la planification des réseaux électriques modernes. Optimisation convexe : écoulement de puissance optimal et relaxations convexes. Optimisation en nombres entiers : planification de la production (*unit commitment*), reconfiguration du réseau et planification de l'expansion du réseau de transport. Optimisation stochastique et robuste : écoulement de la puissance et planification de la production en présence d'énergie renouvelable. Apprentissage supervisé. Régression linéaire : formulation, identification de la topologie du réseau et estimation de l'état du réseau. Classification : K plus proche voisins ( $K$ -NN), régression logistique, machine à vecteur de support (*SVM*) et reconfiguration automatique du réseau. Réseaux neuronaux : formulation, identification des défauts des lignes et des fautes dans le réseau, approximation de fonctions. Apprentissage non supervisé. Méthode de groupement : K-moyenne et identification des profils de consommation. Apprentissage par renforcement : programmation dynamique,  $Q$ -learning, SARSA, tarification dynamique (temps réel et tarif critique), gestion de la demande avec charge thermostatique, opération d'unité de stockage. À noter qu'une maturité mathématique ainsi qu'une connaissance

de base de Python sont requises pour ce cours.

Cours Préalables	Cours Corequis	Cours Subséquents
≥ 70 crédits	∅	∅

## Horaire

### Cours

Groupe	Jour	Heure	Local	Enseignant
01	Jeudi	9h30, 10h30, 11h30	M-2201	Lesage-Landry, Antoine

### Travaux pratiques

Groupe	Jour	Heure	Local	Enseignant
01	Jeudi	13h45, 14h45 (B2)	A-328	Pallage, Julien

## Qualités du BCAPG

Ce tableau présente les 12 qualités requises par le BCAPG. Vous trouverez ci-dessous les qualités qui seront développées dans ce cours selon les niveaux suivants : Introduction (IN), Approfondissement (AP) et Contrôle des Acquis (CA). Une version détaillée de ce tableau est disponible à la fin du plan de cours. Vous pouvez également regarder cette [vidéo explicative](#) sur les 12 qualités.

1 Connaissances en génie	2 Analyse de problèmes	3 Investigation	4 Conception	5 Utilisation d'outils d'ing.	6 Travail ind. et en équipe
AP	AP	AP	–	AP	–
7 Communication	8 Professionalisme	9 Impacts soc. et environn.	10 Déontologie et équité	11 Économie et gestion de projets	12 Apprentissage continu
–	–	–	–	–	–

## Objectifs d'apprentissage

Objectifs du cours et des travaux pratiques	Correspondance avec les qualités du BCAPG
1. De concevoir des approches basées sur des méthodes d'optimisation et d'apprentissage de pointe pour la gestion, l'opération, la planification et l'analyse des réseaux électriques.	Qualités 1, 2 & 3
2. D'implémenter numériquement les méthodes discutées en classes sur des réseaux électriques réels.	Qualité 5
3. D'identifier les avantages et les limitations d'une méthode d'optimisation ou d'apprentissage lorsque appliquée à un problème de réseau électrique.	Qualités 1, 2, 3 & 5
4. De justifier son choix de méthode d'optimisation ou d'apprentissage dans le cadre d'un problème de réseau électrique étudié.	Qualités 1, 2, 3 & 5

## Utilité du cours

Le cours *ELE8453 – Méthodes d'optimisation et d'apprentissage pour les réseaux électriques* présente des outils d'optimisation et d'apprentissage à travers des problèmes standards des réseaux électriques modernes. Chaque sujet est rigoureusement introduit et l'accent est mis sur l'efficacité numérique des approches développées. Le cours insistera sur la modélisation des problèmes de prises de décision des réseaux électriques à l'aide d'outils mathématiques de pointe. Finalement, lors des travaux pratiques, les modèles seront implémentés numériquement afin d'être résolus à optimalité.

## Méthodes d'enseignement et d'apprentissage

Le contenu du programme est présenté sous forme d'exposés magistraux. Les exposés sont accompagnés de notes de cours, de démonstrations et d'exemples, le tout traité au tableau. Afin de garder le cours vivant, le professeur sera amené à interroger fréquemment les étudiant.e.s sous diverses formes : questions simples, résolutions de problèmes, etc. Les étudiant.e.s sont fortement encouragé.e.s à poser des questions et à parfaire leur apprentissage à l'aide des lectures suggérées, voir *Guide de lecture* sur [Moodle](#).

Les travaux pratiques (TP) sont consacrés à l'application des notions vues en classe et leur implémentation numérique. Les étudiant.e.s travailleront en seul au poste du A-328 sur les sujets proposés ; en plus de répondre aux questions, les chargé.e.s et les répétiteurs.trices vérifieront les progrès au cours de la séance. Les TP sont faits en Python via l'application web Colab. La composante numérique sera complétée par une partie de modélisation présentée en classe par le chargé. Six (6) TPS couvriront chacun des aspects différents du cours.

Les sujets de TPS sont les suivants :

TP	Titre	Date
1	Introduction à cvxpy et implémentation numérique de l'EPO	18 janvier 2024
2	Reconfiguration du réseau de distribution	1 <sup>er</sup> février 2024
3	Positionnement optimal de ressources énergétiques décentralisées renouvelables dans le réseau à l'aide de l'optimisation stochastique	14 février 2024
4	Estimation de la topologie du réseau	29 février 2024
5	Prédiction de la charge à l'aide un réseau de neurone	21 mars 2024
6	Approche de Q-learning pour les charges thermostatiques	4 avril 2024

Bien que les TP ne soient pas notés, il est essentiel pour les étudiant.e.s de les compléter dûment, car ils sont directement liés aux devoirs. L'équipe d'enseignement sera disponible pour répondre à un large éventail de questions quant aux TP. Elle pourra regarder avec les étudiant.e.s les codes afin débayer le tout. Ceci ne sera pas fait pour les devoirs.

# Évaluations

Les étudiant.e.s sont évalué.e.s au moyen de deux (2) examens et de trois (3) devoirs selon la pondération suivante :

Nature	Nombre	Mode de réalisation	Pondération	Date	Durée
Examen de mi-session	1	Individuel	30%	Jeudi le 22 février 2023	2h50
Examen final	1	Individuel	40%	À venir	2h30
Devoirs	3	Individuel	$10\% \times 3 = 30\%$	Voir tableau des remises	∅

La correction des examens, des devoirs, et des travaux pratiques se base sur les éléments suivants : démarche, clarté, justification et justesse de la réponse.

## Examens

- L'examen de mi-session se fera en classe **jeudi le 22 février 2024 entre 9h30 et 12h20**, soit durant les heures normales de cours de la semaine 7. L'examen de mi-session couvrira les chapitres 1 à 4 inclusivement.
- L'examen final est administré par le Registrariat. L'examen final portera sur tous les chapitres, mais une attention particulière sera portée aux chapitres 5 à 7 inclusivement.

Pour l'examen de mi-session, une feuille (8.5" × 11", recto-verso) d'aide-mémoire personnelle préparée par l'étudiant.e de façon manuscrite ou électronique est permise. Pour l'examen final, deux feuilles sont permises. Aucune calculatrice n'est permise ni nécessaire pour les examens. En cas d'absence dûment justifiée à l'examen de mi-session ou à l'examen final, l'étudiant.e aura droit à un examen différé écrit ou oral dans les mêmes conditions.

## Devoirs

Le cours comporte trois devoirs. Les devoirs sont composés d'une question d'implémentation nécessitant de la programmation en Python et de plusieurs questions théoriques. Chaque devoir est précédé d'une séance de travaux dirigés où les concepts en lien avec la question d'implémentation numérique sont introduits. Les remises se feront via Moodle et sous format pdf et py/ipynb. Le style de question des devoirs et des examens est similaire. À noter que les examens couvriront davantage de chapitres étant donné les contraintes horaires. Le corrigé détaillé des devoirs sera disponible sur le site web du cours après leur remise. Le calendrier des remises est le suivant.

Devoir	Date
#1	15 février 2024, 8h30
#2	28 mars 2024, 8h30
#3	11 avril 2024, 8h30

## Charge de travail\*

Ce cours devrait vous demander environ 135 heures de travail pour toute la session. Le tableau suivant est une estimation de la répartition de ces heures.

Activités	Nombre d'heures estimées
Cours magistraux : 3 heures/semaine × 12 semaines	36 heures
Examen de mi-session	3 heures
Examen final	2.5 heures
Travaux pratiques : 2 heures/2 semaines × 6 semaines + 1 heure session de révision	13 heures
Étude personnelle : 3 heures/semaine × 12 semaines	36 heures
Devoirs : 9 heures × 3 devoirs	27 heures
Préparation à examen de mi-session : 7.5 heures	7.5 heures
Préparation à l'examen final : 10 heures	10 heures
<b>Total</b>	<b>135 heures</b>

\* Cette information est donnée à titre indicatif seulement. Certaines personnes peuvent avoir besoin d'investir plus ou moins de temps.

## Personnes-ressources

Pour toute question d'ordre général relative au cours ou aux travaux pratiques, utiliser le forum du cours disponible sur le site [Moodle](#) pour en discuter avec votre professeur, vos chargé.e.s de laboratoire et vos pairs. Ce groupe est modéré par l'équipe pédagogique du cours.

Pour les questions personnelles relatives au cours (matière, exercices, situation particulière, etc.), privilégier un message direct au professeur via Webex ou par courriel à [antoine.lesage-landry@polymtl.ca](mailto:antoine.lesage-landry@polymtl.ca). Vous aurez une réponse dans les meilleurs délais. Un appel vidéo ou un rendez-vous pourra être planifié si la question le nécessite.

Pour les questions en lien avec votre propre travail en lors des séances de travaux pratiques, vous référer directement à votre chargé et à votre répétiteur.

### Périodes de disponibilités

Le professeur offrira une période de disponibilité au M-5111 afin de répondre aux questions des étudiants.es sur les concepts théoriques couverts en classes en plus des divers problèmes suggérés sur demande. Les étudiants.es doivent prendre rendez-vous via Webex ou par courriel à [antoine.lesage-landry@polymtl.ca](mailto:antoine.lesage-landry@polymtl.ca).

## Documentation

### Documentation obligatoire (disponible sur le site [Moodle](#))

La principale source de documentation pour ce cours provient des notes de cours du professeur (notes manuscrites et diapositives).

- notes de cours manuscrites ;
- présentations ;
- notebooks Colab des travaux pratiques ;
- recueil de problèmes.

**Documentation recommandée** De plus, trois livres de référence sont suggérés :

- [1] [taylor2015convex](#)
- [2] [friedman2001elements](#) (disponible en ligne gratuitement)
- [3] [sutton2018renforcement](#) (disponible en ligne gratuitement)

Pour chaque séance de cours, des lectures provenant des livres précédents sont suggérées dans le document *Guide de lecture* disponible sur le site du cours.

### Documentation facultative

Les livres de référence suivants sont suggérés en complément, par exemple, pour approfondir ses connaissances en optimisation, en apprentissage ou en réseau électrique :

- [4] [boyd2004convex](#) (disponible en ligne gratuitement)

[5] **calafiore2014optimization**

[6] **horn2012matrix**

[7] **machowski1997power**

## Programme du cours

Chapitre	Sujet(s)	Contenu	Durée
	Introduction	Plan de cours	1 heure
Première partie du cours (avant examen de mi-session)			
Chapitre 1	Notions de base	Introduction à l'écoulement de puissance et sa forme linéaire; introduction à l'optimisation convexe et motivation dans le contexte des réseaux électriques.	3 heures
Chapitre 2	Écoulement de puissance optimal (EPO)	Introduction & applications de l'EPO; formulation du problème et linéarisation; relaxations convexes et leurs motivations dans le contexte de l'EPO; exactitude des relaxations pour topologie radiale; écoulement de puissance optimal multi-période.	6 heures
Chapitre 3	Planification des réseaux électriques	Introduction à l'optimisation en nombres entiers & motivation pour la gestion des réseaux électriques; planification de la production ( <i>unit commitment</i> ): formulation du problèmes (objectif, contraintes, contraintes disjonctives, écoulement de puissance)	4 heures
Chapitre 4	Intégration des énergies renouvelables et incertitudes	Incertitude dans les réseaux électriques (énergie renouvelable, charges, gestion de la demande); introduction à l'optimisation stochastique, problème à deux étapes et approximation de la moyenne des échantillons; application: planification de la production en présence de sources d'énergie renouvelable.	5 heures
Deuxième partie du cours			
Chapitre 5	Apprentissage supervisé & réseaux électriques	Introduction aux méthodes d'apprentissage et exemples d'application dans les réseaux électriques; régression linéaire: formulation & extensions; apprentissage de la topologie du réseau électrique; apprentissage de l'état du réseau; classification: formulation & motivations; méthodes de classifications: $K$ plus proche voisins ( $K$ -NN), régression logistique et machine à vecteur de support (SVM); applications en réseau électrique (reconfiguration du système automatique, planification de la production); réseaux de neurones artificiels, rétro-propagation du gradient ( <i>backpropagation</i> ); application en réseau électrique: prédiction de la charge.	9 heures
Chapitre 6	Apprentissage par renforcement & réseaux électriques	Définition du problème d'apprentissage; Processus de décision markovien (MDP); motivation et applications dans le contexte des réseaux électriques (tarification dynamique, tarification critique, gestion de la demande); introduction à la programmation dynamique et limitations; introduction et motivation de l'apprentissage par renforcement (RL); méthodes de RL: $Q$ -learning et SARSA; $Q$ -learning pour la gestion de la demande d'une charge thermostatique.	6 heures
Chapitre 7	Apprentissage non-supervisé & réseaux électriques	Définition; méthode de regroupement ( <i>clustering</i> ): $K$ -moyennes ( $K$ -means); identification de profile de consommation dans le réseau et dénombrement des charges avec panneaux solaires.	3 heures

## Fraude : règlement et sanctions

En tant que futur.e ingénieur.e, les étudiantes et les étudiants doivent adopter une attitude professionnelle exemplaire. L'article 8 des règlements des études au baccalauréat présente la position de Polytechnique Montréal à l'égard de la fraude sur la base du principe de tolérance zéro. Voici quelques éléments [tirés du règlement](#) en vigueur.

Par fraude, on entend toute forme de plagiat, de tricherie ou tout autre moyen illicite utilisé par une étudiante ou un étudiant pour obtenir un résultat d'évaluation non mérité ou pour influencer une décision relative à un dossier académique.

À titre d'exemple, constituent une fraude :

- l'utilisation totale ou partielle, littérale ou déguisée, d'une œuvre d'autrui, y compris tout extrait provenant d'un support électronique, en le faisant passer pour sien ou sans indication de référence à l'occasion d'un examen, d'un travail ou de toute autre activité faisant l'objet d'une évaluation ;
- le non respect des consignes lors d'un contrôle, d'un examen, d'un travail ou de toute autre activité faisant l'objet d'une évaluation ;
- la sollicitation, l'offre ou l'échange d'information pendant un contrôle ou un examen ;
- la falsification de résultats d'une évaluation ou de tout document en faisant partie ;
- la possession ou l'utilisation pendant un contrôle ou un examen de tout document, matériel ou équipement non autorisé y compris la copie d'examen d'une autre personne étudiante.

Selon la gravité de l'infraction et l'existence de circonstances atténuantes ou aggravantes, l'étudiante ou l'étudiant peut se voir imposer une sanction correspondant à, entre autres, l'attribution de la cote 0 pour l'examen, le travail ou toute autre activité faisant l'objet d'une évaluation qui est en cause, l'attribution de la note F pour le cours en cause, l'attribution de la note F à tous les cours suivis au trimestre.

Dans le cas d'un travail en équipe, les étudiantes et les étudiants d'une même équipe de travail tel que reconnu par l'enseignant sont solidaires du matériel produit au nom de l'équipe. Si un membre de l'équipe produit et remet un travail au nom de l'équipe et qu'il s'avère que ce travail est frauduleux tous les membres de l'équipe sont susceptibles de recevoir une sanction à moins qu'il soit démontré sans ambiguïté que l'infraction est le fait d'un ou de quelques membres de l'équipe en particulier.

## Ressources et services pour les étudiantes et étudiants

Le [Service aux étudiants](#) (SEP) est constitué de professionnels qualifiés et d'une Escouade étudiante, dédiés à favoriser votre bien-être et votre réussite à Polytechnique Montréal, autant sur le plan académique, personnel que social. Que ce soit sous la forme de rencontres individuelles, d'ateliers pratiques ou de programmes tels que le tutorat et le mentorat, les services offerts vous aideront à vous épanouir à votre plein potentiel durant vos études à Polytechnique Montréal. N'hésitez pas à les contacter. Vous avez tout à y gagner !

Le [Bureau d'intervention et de prévention des conflits et de la violence](#) (BIPCV), vous accueille, vous guide et vous soutient en matière de violence à caractère sexuel, harcèlement ou tout enjeu relatif au respect des personnes. Le BIPCV est un bureau indépendant, assurant un service respectant la confidentialité et une écoute sans jugement. Contactez-les : [bipcv@polymtl.ca](mailto:bipcv@polymtl.ca) 514 340-4711 Poste 5151.



## Qualités requises des diplômé.es par le BCAPG

Ce tableau présente les 12 qualités requises par le BCAPG. Vous trouverez ci-dessous les qualités qui seront développées dans ce cours selon les niveaux suivants : Introduction (IN), Approfondissement (AP) et Contrôle des Acquis (CA).

	Qualité	Déclinaison	IN	AP	CA
1	<b>Connaissances en génie</b> : connaissance, à un niveau universitaire, des mathématiques, des sciences naturelles et des notions fondamentales de l'ingénierie, ainsi qu'une spécialisation en génie propre au programme.	1.1 Démontrer des connaissances de base en mathématiques et en sciences		X	
		1.2 Démontrer des connaissances de base en génie		X	
		1.3 Démontrer des connaissances avancées en génie		X	
2	<b>Analyse de problèmes</b> : capacité d'utiliser les connaissances et les principes appropriés pour identifier, formuler, analyser et résoudre des problèmes d'ingénierie complexes et en arriver à des conclusions étayées.	2.1 Identifier et formuler un problème		X	
		2.2 Explorer des approches de résolution et planifier la démarche		X	
		2.3 Conceptualiser ou modéliser le problème		X	
		2.4 Produire des résultats		X	
		2.5 Valider ses résultats et recommander		X	
		2.6 Analyser l'incertitude, la sensibilité et les limites des approches		X	
3	<b>Investigation</b> : capacité d'étudier des problèmes complexes au moyen de méthodes mettant en jeu la réalisation d'expériences, l'analyse et l'interprétation des données et la synthèse de l'information afin de formuler des conclusions valides.	3.1 Formuler des hypothèses testables		X	
		3.2 Faire la revue de la documentation existante		X	
		3.3 Planifier et préparer des essais		X	
		3.4 Exécuter l'expérimentation		X	
		3.5 Analyser les résultats expérimentaux		X	
		3.6 Vérifier les hypothèses et argumenter		X	
4	<b>Conception</b> : capacité de concevoir des solutions à des problèmes d'ingénierie complexes et évolutifs et de concevoir des systèmes, des composants ou des processus qui répondent aux besoins spécifiés, tout en tenant compte des risques pour la santé et la sécurité publiques, des aspects législatifs et réglementaires, ainsi que des incidences économiques, environnementales, culturelles et sociales.	4.1 Identifier les besoins, requis et fonctions			
		4.2 Modéliser les éléments à concevoir			
		4.3 Procéder à la conception			
		4.4 Considérer les relations systémiques internes/externes			
		4.5 Évaluer et itérer			
		4.6 Innover dans sa conception			
5	<b>Utilisation d'outils d'ingénierie</b> : capacité de créer et de sélectionner des techniques, des ressources et des outils d'ingénierie modernes et de les appliquer, de les adapter et de les étendre à un éventail d'activités simples ou complexes, tout en comprenant les contraintes connexes.	5.1 Évaluer et sélectionner les outils appropriés		X	
		5.2 Appliquer un outil d'ingénierie		X	
		5.3 Créer ou adapter un outil		X	
		5.4 Intégrer des outils		X	
6	<b>Travail individuel et en équipe</b> : capacité de fonctionner efficacement en tant que membre ou chef d'équipe, de préférence dans un contexte de travail multidisciplinaire.	6.1 Établir et remplir son rôle dans l'équipe			
		6.2 Interagir en équipe			
		6.3 Contribuer au fonctionnement de l'équipe			
		6.4 Contribuer à l'évolution de l'équipe			
7	<b>Communication</b> : habileté à communiquer efficacement des concepts d'ingénierie complexes, au sein de la profession et au public en général, notamment lire, rédiger, parler et écouter, comprendre et rédiger de façon efficace des rapports et de la documentation pour la conception, ainsi qu'énoncer des directives claires et y donner suite.	7.1 Lire et rédiger de la documentation			
		7.2 Préparer et donner une présentation			
		7.3 Adapter son discours selon la situation			
8	<b>Professionalisme</b> : compréhension des rôles et des responsabilités de l'ingénieur dans la société, y compris le rôle essentiel de protection du public et l'intérêt public.	8.1 Reconnaître l'agir professionnel			
		8.2 Expliquer les rôles de l'ingénieur			
		8.3 Expliquer les responsabilités de l'ingénieur, y compris la protection du public			
9	<b>Impact du génie sur la société et l'environnement</b> : capacité à analyser les aspects sociaux et environnementaux des activités liées au génie, notamment comprendre les interactions du génie avec les aspects économiques et sociaux, la santé, la sécurité, les lois et la culture de la société; les incertitudes liées à la prévision de telles interactions; et les concepts de développement durable et de bonne gestion de l'environnement.	9.1 Connaître les principes du développement durable			
		9.2 Analyser l'impact socio-économique de son travail			
		9.3 Analyser l'impact de son travail sur l'environnement			
		9.4 Évaluer les risques et les incertitudes d'une situation			
10	<b>Déontologie et équité</b> : compréhension et respect des principes d'éthique et de responsabilité professionnelles, ainsi que d'équité.	10.1 Respecter le code de déontologie			
		10.2 Agir avec intégrité et de façon éthique			
		10.3 Traiter les situations de façon équitable			
11	<b>Économie et gestion de projets</b> : capacité à intégrer de façon appropriée les pratiques d'économie et d'affaires, comme la gestion de projets, des risques et du changement, dans l'exercice du génie, et de bien tenir compte des contraintes associées à ces pratiques.	11.1 Appliquer les principes économiques			
		11.2 Planifier et gérer un projet			
		11.3 Gérer les risques ou le changement			
12	<b>Apprentissage continu</b> : capacité à cerner et à combler ses propres besoins de formation dans un monde en constante évolution, et ce, de façon à maintenir sa compétence et à contribuer à l'avancement des connaissances.	12.1 Identifier et palier les lacunes dans ses savoirs et ses savoir-faire			
		12.2 Identifier et combler ses besoins de formation			
		12.3 Identifier les besoins d'avancement des connaissances			