

## Plan de cours

### **GML6402A - Géostatistique**

Département des génies civil, géologique et des mines

Automne 2024

3 (3-0-6)

Mardi de 11 :30 à 14 :20 au A-526

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

### Coordonnées et disponibilités

<b>Nom</b>	<b>Dany Lauzon</b>
Bureau	B-656 (Actuellement, B258.3)
Téléphone	(514) 340-4711 poste 3426
Courriel	<a href="mailto:dany-2.lauzon@polymtl.ca">dany-2.lauzon@polymtl.ca</a>
Disponibilité	Lundi de 9ham à 12ham. Par prise de rendez-vous. Réponse rapide par courriel.

### Coordonnateur ou coordonnatrice

<b>Nom</b>	Dany Lauzon
<b>Courriel</b>	<a href="mailto:dany-2.lauzon@polymtl.ca">dany-2.lauzon@polymtl.ca</a>

### Description du cours

¶ Géostatistique linéaire, stationnaire et non stationnaire, univariable et multivariable. Variances de blocs, de dispersion, d'estimation. Krigeages simple, ordinaire, avec dérive, avec dérive externe; formulation duale. Cokrigeage. Variogrammes, variogrammes croisés, fonctions de covariances, covariances croisées; modèles et conditions d'admissibilité. Krigeages et cokrigeages d'indicateurs et multigaussiens. Simulations non conditionnelles et conditionnelles : méthodes des bandes tournantes, séquentielles, matricielles, spectrales; post-conditionnement. Cosimulations. Simulations plurigaussiennes, multipoints. Recuit simulé, déformations graduelles. Applications en hydrogéologie, géotechnique, environnement, géophysique, estimation des ressources, exploitation des mines.

## Utilité du cours

¶ À la fin du cours, l'étudiant :

1. comprendra les hypothèses sous-jacentes à toute modélisation géostatistique;
2. sera familier avec les notions de variance de bloc et de variance d'estimation et saura estimer et modéliser un variogramme;
3. comprendra les principales propriétés des estimateurs du krigeage et le lien qu'ils présentent avec le variogramme;
4. pourra réaliser des krigeages avec dérive;
5. pourra exprimer le krigeage sous forme duale et s'en servir pour imposer des contraintes;
6. pourra modéliser des cas multivariés simples;
7. pourra réaliser des cokrigeages, krigeage avec dérive externe et autres variantes multivariés;
8. pourra effectuer des simulations conditionnelles, ou non, présentant un variogramme donné;
9. connaîtra les approches de type multipoints et les simulations plurigaussiennes;
10. aura été sensibilisé à diverses applications de ces techniques dans des domaines variés des sciences de la terre;
11. saura utiliser pour ses propres recherches les principaux outils linéaires et non-linéaires, univariés et multivariés, disponibles en géostatistique;
12. pourra résoudre des problèmes inverses d'un point de vue stochastique.

## Méthodes d'enseignement et d'apprentissage

¶ Exposés formels donnés par le professeur et séances d'exercices dirigés. Réalisation de travaux pratiques par les étudiants. Discussion d'article en classe. La participation des étudiants aux discussions est fortement encouragée.

Des notes de cours du professeur sont utilisées et sont disponibles sur le site web. Les présentations « Powerpoint » s'y retrouvent également en format pdf. Des exercices en lien avec chaque cours théorique sont disponibles sur le site web et à réaliser chez soi.

Les devoirs nécessitent de la programmation en Matlab et/ou python.

Manuel de référence :

Chilès J.P. et Delfiner P., (2012). *Geostatistics: Modeling spatial uncertainty*. Wiley, New York.

Pyrz J. M. et Deutsch V. C., (2012) *Geostatistical Reservoir Modeling*. Second Edition. Oxford University Press.

Articles:

[1] Bárdossy, A., & Hörning, S. (2023). Definition of Spatial Copula Based Dependence Using a Family of Non-Gaussian Spatial Random Fields. In *Water Resources Research* (Vol. 59, Issue 7). American Geophysical Union (AGU). <https://doi.org/10.1029/2023wr034446>

[2] Dimitrakopoulos, R., Mustapha, H., & Gloaguen, E. (2009). High-order Statistics of Spatial Random Fields: Exploring Spatial Cumulants for Modeling Complex Non-Gaussian and Non-linear Phenomena. In *Mathematical Geosciences* (Vol. 42, Issue 1, pp. 65–99). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s11004-009-9258-9>

[3] Emery, X., Arroyo, D., & Porcu, E. (2015). An improved spectral turning-bands algorithm for simulating stationary vector Gaussian random fields. In *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* (Vol. 30, Issue 7, pp. 1863–1873). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s00477-015-1151-0>

[4] Iaco, S. D., Myers, D. E., & Posa, D. (2001). Space–time analysis using a general product–sum model. In *Statistics & Probability Letters* (Vol. 52, Issue 1, pp. 21–28). Elsevier BV. [https://doi.org/10.1016/s0167-7152\(00\)00200-5](https://doi.org/10.1016/s0167-7152(00)00200-5)

[5] Jo, H., & Pyrcz, M. J. (2021). Automatic Semivariogram Modeling by Convolutional Neural Network. In *Mathematical Geosciences* (Vol. 54, Issue 1, pp. 177–205). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s11004-021-09962-w>

[6] Lauzon, D., & Marcotte, D. (2023). Joint hydrofacies-hydraulic conductivity modeling based on a constructive spectral algorithm constrained by transient head data. In *Hydrogeology Journal* (Vol. 31, Issue 6, pp. 1647–1664). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s10040-023-02638-1>

[7] Lauzon, D. (2024). A U-Net architecture as a surrogate model combined with a geostatistical spectral algorithm for transient groundwater flow inverse problems. In *Advances in Water Resources* (Vol. 189, p. 104726). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2024.104726>

[8] Linde, N., Renard, P., Mukerji, T., & Caers, J. (2015). Geological realism in hydrogeological and geophysical inverse modeling: A review. In *Advances in Water Resources* (Vol. 86, pp. 86–101). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.09.019>

[9] Mariethoz, G., Renard, P., & Caers, J. (2010a). Bayesian inverse problem and optimization with iterative spatial resampling. In *Water Resources Research* (Vol. 46, Issue 11). American Geophysical Union (AGU). <https://doi.org/10.1029/2010wr009274>

[10] Mariethoz, G., Renard, P., & Straubhaar, J. (2010b). The Direct Sampling method to perform multiple-point geostatistical simulations. In *Water Resources Research* (Vol. 46, Issue 11). American Geophysical Union (AGU). <https://doi.org/10.1029/2008wr007621>

[11] Neven, A., & Renard, P. (2023). A Novel Methodology for the Stochastic Integration of Geophysical and Hydrogeological Data in Geologically Consistent Models. In *Water Resources Research* (Vol. 59, Issue 7). American Geophysical Union (AGU). <https://doi.org/10.1029/2023wr034992>

[12] Ravalec, M. L., Noetinger, B., & Hu, L. Y. (2000). In *Mathematical Geology* (Vol. 32, Issue 6, pp. 701–723). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1023/a:1007542406333>

[13] Zheng, Z., & Dai, H. (2017). Simulation of multi-dimensional random fields by Karhunen–Loève expansion. In *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* (Vol. 324, pp. 221–247). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.05.022>

## Évaluation

NATURE	NOMBRE	Mode de réalisation (Individuel/équipe)	PONDÉRATION	DATE
Devoirs	10	Individuel	70%	voir calendrier
Projet	1	Individuel	30%	voir calendrier

**Il est important de noter que tous les devoirs sont évalués avec la même pondération.**

**Le professeur s’attend à ce que tous les étudiants assistent aux séances en classe et participe aux discussions.**

## Critères d’évaluation

Ils seront précisés selon les travaux. La pondération de chaque question sera indiquée pour les devoirs et le projet.

Pour les devoirs et projet :

Le matériel produit par les systèmes d’intelligence artificielle (IA) générative (ex : ChatGPT, OpenAI Codex, GitHub etc...) ou par Wikipedia ne peut être cité dans les références de travaux pratiques.

Les robots conversationnels peuvent être utiles en cas de préalables manquants ou déficients – tout en gardant à l’esprit le caractère faillible des outils. Toutefois, il est interdit de les utiliser pour résoudre les devoirs ou les problèmes des exercices dirigés à la place des personnes étudiantes.

Les étudiantes et étudiants doivent être conscients des enjeux relatifs à l’utilisation des systèmes d’intelligence artificielle générative. Notamment au sujet de :

- La fiabilité des réponses;
- La fraude et le plagiat;
- La confidentialité des données et le respect du droit d’auteur.

## Documentation

¶ Diapositives PPT du professeur disponibles sur Moodle. Notes de cours sur le site internet. La partie géologie minière est protégée : l’usager et le mot de passe sont tous deux glq3401 sans majuscule.

## Calendrier des rencontres

Sem.	Séance	Contenu	Référence
1	27 août	Variogrammes et covariances (expérimentaux et modèles). Conditions d’admissibilité. Méthodes d’ajustements (visuelle, moindres carrés, vraisemblance maximale, validation croisée).	C&D. p. 28-66, p.84-122, p. 130-137 P&D.

		Devoir 1	
2	3 sept.	Variance de blocs et de dispersion. Concept et méthodes de calcul. Applications. Variance d'estimation. Définition et interprétation. Calcul. Devoir 2	C&D. p. 78-84, 386-477
3	10 sept.	Krigeage simple, ordinaire et avec dérive. Obtention des équations et exemples. Estimation de la covariance des résidus. Krigeage sous forme duale. Équation et utilité. Inclusion de contraintes linéaires dans les krigeages. Devoir 3	C&D. p. 122-130, p.147-237
4	17 sept.	Géostatistique multivariable. Covariance croisée. Variogramme croisé. Modèle linéaire de corégionalisation. Conditions de succès. Influence du voisinage. Inclusion de relations déterministes entre variables, points doublons, exemples en hydrogéologie. Admissibilité des modèles multivariables. Devoir 4	C&D. p. 299-385
5	24 sept.	Krigeage d'indicatrice. Krigeage avec contraintes d'inégalité. Modèle gaussien discret. Conditionnement uniforme. Devoir 5	C&D. p. 397-406
	1 oct.	Aucune cours - Reprise - Journée du lundi	
6	8 oct.	Nécessité des simulations. Simulations non-conditionnelles et conditionnelles. Méthode LU. Simulation Séquentielle Gaussienne et ses variantes. Devoir 6	C&D p.478-501
Semaine de relâche			
7	22 oct.	Simulations par bandes tournantes (spatiales et spectrales). Méthode FFTMA. Simulation d'expansion Karhunen-Loève. Post-conditionnement par krigeage. Devoir 7	C&D p.502-545, Articles : Ravalec et al. (2000) Emery et al. (2016) Zheng et Dai (2017)
8	29 oct.	Méthode plurigaussiennes. Codage et paramètres de contrôle. Proportions variables. Simulation avec contraintes d'inégalité. Échantillonneur de Gibbs. Méthodes multipoints (début). Application à l'hydrogéologie avec ArchPy. Devoir 8	C&D p. 546-594 Article : Mariethoz et al. (2010b)
9	5 nov.	Méthodes multipoints (suite). Simulation de statistiques d'ordre supérieures. Corrélation des rangs. Asymétrie directionnelle. Moments statistiques d'ordre supérieurs. Simulation géostatistique des rangs et des asymétries. Devoir 9	Articles : Bárdossy and Hörning (2023) Dimitrakopoulos et al. (2009)
10	12 nov.	Résolutions de problèmes inverses. Linéaire. Non-linéaire. Méthode de Monte-Carlo par chaînes de Markov. Méthode Bayésienne. Filtre de Kalman d'ensemble. Application à l'hydrogéologie et la géophysique. Devoir 10	Articles : Tarantola (2005) - Livre Lauzon (2023) Neven and Renard (2023)
11	19 nov.	Méthode d'optimisation par fonction objectif : Recuit simulé. Points pilotes. Déformation graduelle. Échantillonnage spatiale itératif. FFTMA-SA. S-STBM. Post-traitement des simulations conditionnelles. Simulations non-stationnaires.	C&D p. 594-603 Article : Mariethoz et al. (2010a)
12	26 nov.	Temps pour le projet final	

13	3 dec.	Temps pour le projet final	
----	--------	----------------------------	--

## Fraude : règlement et sanctions

En tant que futur ingénieur, 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 (d'une IA générative, par exemple), 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 la personne enseignante 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. En savoir plus sur leurs services et ressources :