

Calculation methods applied to chemistry

Synopsis (english)

Mathematical prerequisites

Programming bases and tools

- Python programming language
 - [LearnPython.org](#) interactive tutorial with code execution
 - [DataCamp free course "Intro to Python for Data Science"](#)
 - [Python 3 Tutorial](#), interactive, with [code use in web browser](#)
 - MOOCs (massive open online courses) :
 - [An Introduction to Interactive Programming in Python \(Beginners\)](#) (Coursera)
 - [Introduction to Computer Science and Programming Using Python](#) (edX)
-  [Anaconda Python distribution](#) (64 bits, with Python 3.x) :
<https://www.anaconda.com/download/>
 - Includes these tools :
 - Jupyter notebook (interactive web-based environment)
 - qtconsole (high level Python console with graphics & colors)
 - spyder (powerful Python IDE)
 - includes lot of Python libraries : matplotlib, numpy, scipy, pandas,...
 - package management system (conda), virtual environments
 - Anaconda Navigator includes extensive documentation (on anaconda website and dedicated websites)
- GNU/Linux OS (preferred)
- Jupyter introductions, tutorials, ...
 - [Jupyter Notebook Tutorial](#), par Den Kasyanov (Medium)
 - [Jupyter official documentation](#)
 - [Jupyter DataCamp Cheat Sheet](#)

The Microsoft Azure Notebooks environment can be used to execute sample codes, using a professional, personal or student login/account (i.e. student login from UMONS). The following public sample notebooks are then available to test Jupyter text and coding features :

- <https://notebooks.azure.com/linusable/libraries/samples-public>
 - e.g. https://notebooks.azure.com/linusable/libraries/samples-public/html/notebooks/second_degree_polynomial_and_roots-01.ipynb (Second degree polynomial and roots)

- Python scientific libraries (official websites including tutorials and documentation)
- cf. [this](#) (french)

- [Matplotlib](#) (scientific graphs)
- [NumPy](#) (array manipulations, linear algebra, Fourier transforms, random numbers,...)
- [SciPy](#) numerical methods (integrations, ODE, PDE,...)
- [SymPy](#) symbolis maths
- [Pandas](#), data analysis
- [PyLab](#), combine Matplotlib, NumPy and SciPy
- [Scikit-learn](#), machine learning

Fundamental numerical methods

- [Systems of linear equations](#)
 - Diagonalisation and triangularisation
 - LU decomposition : factorization in triangular matrices
- [Root findings : equations \$f\(x\) = 0\$](#)
 - Polynomial equations
 - Dichotomy
 - Secant method, Regula falsi
 - Newton-Raphson method
- [Numerical intégration](#) (integrals)
 - Simpson method and gaussian quadratures

Learning outcomes :

- Systems of linear equations
 - failing of the theoretical way to solve a linear system using determinant and cofactors (np complexity)
 - triangularisation and diagonalisation principles : algorithm and complexity
 - “divide by zero” errors and pivot solutions
 - extension towards the matrix inversion
 - lower-upper LU decomposition and complexity (N^3 for the decomposition step and N^2 for substitution step). How to solve systems with varying independant vectors
 - special matrix require special algorithms : tridiagonal matrix algorithm (Thomas algorithm)
- Root findings
 - Bisection method (dichotomy) : simple and robust algorithm, invariant loop, slow convergence
 - iterative transformation $x = f(x)$, convergence and divergence situations
 - secant and regula falsi methods, Convergence Criterion of the Fixed Point Method
 - Newton-Raphson method (use of derivatives), quadratic convergence, failure, tolerance and stop condition
 - Van Wijngaardeb-Dekker-Brent method (“black box” in numerical packages)
 - Roots of polynomials and Bairstow's method
- Numerical intégration

Classical numerical methods

Ordinary_differential_equations (ODE)

Numerical solutions of ODE

- principe de discrétisation, méthode d'Euler
- Améliorations et méthodes de Runge-Kutta
- Runge-Kutta d'ordre 4
- Contrôle du pas d'intégration
- Méthodes predictor-corrector
- Méthodes d'extrapolation (Richardson, Burlish-Stoer)
- applications :
 - équations de cinétique chimique
 - Équation logistique
 - [Modèle de Verhulst](#), [dynamique des populations](#) et non-linéarité
 - Bifurcation, doublements de périodes et transition vers le chaos
 - Réactions chimiques oscillantes : Belousov-Zhabotinsky, Brusselator, Oregonator
 - Modèle proie-prédateur
 - Attracteur étrange, modèle atmosphérique de Lorenz

Partial_differential_equations (PDE)

Numerical solutions of PDE

- Domaine d'application des équations : équation de diffusion, équation d'ondes, équations de Navier-Stokes
- Types de traitements numériques
- Différences finies et problèmes de diffusion
- Schémas classiques de différences finies
 - Résolutions stationnaires
 - Résolutions dépendantes du temps
- Méthodes explicites, critère de (ou d'in)stabilités et méthodes implicites

Eigenvalues and eigenvectors

Eigenvalues and eigenvectors

applications à des problèmes de relaxation et de population, analyse de modes normaux de vibration, PCA (principal component analysis),...

Non-linear systems of equations

- Newton-Raphson method

Linear and non-linear least squares approximations

- Application to deconvolution (Levenberg–Marquardt algorithm)
- Références :
 - [An Open-Source, Cross-Platform Resource for Nonlinear Least-Squares Curve Fitting](#)
Andreas Möglich, J. Chem. Educ., 2018, 95 (12), pp 2273–2278 DOI:
10.1021/acs.jchemed.8b00649

Chebyshev approximation

+ discussion of some approximations like  [Bhaskara I's sine approximation formula](#)

- <https://twitter.com/fermatslibrary/status/1267450081151782913>

Molecules modelisation and visualization

Minimization

Conformational problems

Additional subjects

- Bioinformatics and related algorithm (biochemistry, mass spectrometry,...)
- Chemistry
 - quantum calculations, optimization, molecular mechanics
 - visualization, virtual reality
 - chemical informations on structures and reactions
- Data science, statistics (Python modules : Scipy, Pandas,...)
 - Time series analysis
 - Machine learning (Scikit-learn,...)
- Data visualization
 - boxplot, 3D, animations, graphs,...
- Sensors and interfaces, Arduino, Raspberry Pi, IoT
- Simulations
 - Agent base modelling and complex systems
 - cellular automaton
 - Simpy,...
- Digital image processing, image recognition
 - particle tracking,...

References

- Bioinformatics

- [Biopython](#)
- [Rosalind.info](#), learning bioinformatics by problem solutions
- Machine Learning
 - Scikit-learn
 - [Linear Regression in 6 lines of Python](#) (using scikit-learn)
 - [12 Algorithms Every Data Scientist Should Know](#)
- Deep Learning
 - TensorFlow
 - [Keras Tutorial: Deep Learning in Python](#)
- Arduino
 - [Fabrication of an Economical Arduino-Based Uniaxial Tensile Tester](#), Julien H. Arrizabalaga, Aaron D. Simmons, and Matthias U. Nollert, J. Chem. Educ., 2017, 94 (4), pp 530–533 DOI: 10.1021/acs.jchemed.6b00639
- PCA (principal component analysis)
 - [Learning Principal Component Analysis by Using Data from Air Quality Networks](#), Luis Vicente Pérez-Arribas, María Eugenia León-González, and Noelia Rosales-Conrado, J. Chem. Educ., 2017, 94 (4), pp 458–464 DOI: 10.1021/acs.jchemed.6b00550
 - [Principle Component Analysis in Python](#)
- K-Means
 - [K-means Clustering in Python](#)
- Applications (suggestions, examples,...)
 - [2D Ising Model in Python](#)
- chemistry
 - misc docs :
 - [Extraction of chemical structures and reactions from the literature](#)

Books

- [Solving Differential Equations in R](#), chez Springer, et en version électronique sur [SpringerLink](#)
- [Numerical Methods in Engineering with Python 3](#) 3rd Edition, Jaan Kiusalaas, 2013, Cambridge University Press, isbn: 9781107033856
- ...

Jupyter notebooks

- [Jupyter notebooks and other materials developed for the Columbia course APMA 4300](#)
- [A Concrete Introduction to Probability \(using Python\)](#)

MOOCs

- [Practical Numerical Methods with Python](#)

Miscellaneous

- [Practical Numerical Methods with Python](#)
- <https://github.com/cfgnunes/numerical-methods-python> (?)
- [Presenting Code Using Jupyter Notebook Slides](#)

- <https://choosealicense.com>
 - <https://creativecommons.org/choose/?lang=en>
 - Published applications
 - [Introduction to Stochastic Simulations for Chemical and Physical Processes: Principles and Applications](#) Charles J. Weiss, Journal of Chemical Education 2017 94 (12), 1904-1910 DOI: 10.1021/acs.jchemed.7b00395
 - [An overview of the Gradient Descent algorithm](#)
 - [Building A Logistic Regression in Python, Step by Step](#)
 - [Building Linear Regression in Python](#)
-

Synopsis (français)

(Méthodes de calcul appliqué à la chimie)

- Learning outcomes teaching unit (UE):
 - Apply standard numerical methods or existing software to solve numerical problems related to scientific research activities
 - Be active in the search for existing numerical methods adapted to problems encountered by chemists
- Content of the UE:
 - widespread methods : linear systems, numerical integration, root findings
 - Ordinary differential equations (numerical solutions, kinetic applications,...)
 - Partial differential equations (finite differences, diffusion problems)
 - Nonlinear systems of equations (Newton-Raphson method)
 - Eigenvalues eigenvectors problems (applications to relaxation and population problems)
 - Approximation by linear and non-linear least squares methods (maximum likelihood, application to deconvolution)
 - Chebyshev approximation
 - Molecular modeling and visualization
 - Minimization and conformational problems
- Prerequisite skills
 - Basic knowledge of a programming language
 - Basics of Mathematics
- Exercises and applications: codes written in or mainly written in Python, with the general libraries matplotlib, numpy, scipy, pandas as well as other specialized libraries, especially in chemistry
- Types of evaluations: Oral examination based on an in-depth study on one of the chapters of the course or an additional theme
- Acquis d'apprentissage UE :
 - Appliquer des méthodes numériques standards ou des logiciels existant pour résoudre des problèmes fondamentaux ou annexes, liés à des activités de recherche scientifique
 - Être actif dans la recherche de méthodes de résolution numérique existantes et adaptées à des problèmes auxquels les chimistes sont confrontés
- Contenu de l'UE :
 - Équations différentielles ordinaires (résolutions numériques et applications cinétiques)
 - Équations aux dérivées partielles (différences finies, problèmes de diffusion)
 - Systèmes d'équations non linéaires (méthode de Newton-Raphson)
 - Problèmes aux valeurs propres (applications à des problèmes de relaxation et de

- population)
- Approximation par moindres carrés linéaires et non-linéaires (application à la déconvolution)
- Approximation de Tchébychev
- Modélisation et visualisation de molécules
- Minimisation et problèmes conformationnels
- Compétences préalables
 - Connaissance de base d'un langage de programmation
 - Bases des mathématiques
- Exercices et applications : codes écrits ou à écrire principalement en Python, avec les bibliothèques générales matplotlib, numpy et scipy, ainsi que d'autres bibliothèques spécialisées, notamment en chimie
- Types d'évaluations : Examen oral sur base d'un travail approfondi sur un des chapitres du cours ou un thème additionnel

Pré-requis mathématiques

Base de la programmation

Méthodes numériques de base



- [Systèmes d'équations linéaires](#)
 - Diagonalisation et triangularisation
 - Décomposition LU en matrices triangulaires
- [Intégration numérique](#)
 - Simpson et quadratures gaussiennes
- [Résolutions d'équations du type \$f\(x\) = 0\$](#)
 - Équations polynomiales
 - Recherche dichotomique
 - Méthode de la sécante
 - Méthode de Newton-Raphson

Méthodes numériques usuelles

Équations différentielles ordinaires

[Résolutions numériques des ODE](#)

- principe de discrétisation, méthode d'Euler
- Améliorations et méthodes de Runge-Kutta
- Runge-Kutta d'ordre 4
- Contrôle du pas d'intégration
- Méthodes predictor-corrector
- Méthodes d'extrapolation (Richardson, Burlish-Stoer)
- applications :
 - équations de cinétique chimique
 - Équation logistique

-  [Modèle de Verhulst](#),  [dynamique des populations](#) et non-linéarité
- Bifurcation, doublements de périodes et transition vers le chaos
- Réactions chimiques oscillantes : Belousov-Zhabotinsky, Brusselator, Oregonator
- Modèle proie-prédateur
- Attracteur étrange, modèle atmosphérique de Lorenz

Équations aux dérivées partielles

Résolutions numériques des équations aux dérivées partielles

- Domaine d'application des équations : équation de diffusion, équation d'ondes, équations de Navier-Stokes
- Types de traitements numériques
- Différences finies et problèmes de diffusion
- Schémas classiques de différences finies
 - Résolutions stationnaires
 - Résolutions dépendantes du temps
- Méthodes explicites, critère de (ou d'in)stabilités et méthodes implicites

Problèmes aux valeurs propres

Valeurs propres et vecteurs propres

applications à des problèmes de relaxation et de population, analyse de modes normaux de vibration, PCA (principal component analysis),...

Systèmes d'équations non linéaires

Méthode de Newton-Raphson

Approximation par moindres carrés linéaires et non-linéaires

application à la déconvolution

Approximations de Tchébyshev

Modélisation et visualisation de molécules

Minimisation

problèmes conformationnels

Thèmes additionnels

- Bioinformatique et algorithmes spécifiques
- Chimie
 - calculs quantiques, de minimisation, de mécanique moléculaire
 - représentations
- Data science, statistiques (bibliothèque Python Pandas,...)
 - Time series analysis
 - Machine learning (Scikit-learn,...)
- Data visualization
 - boxplot, 3D, animations, graphes,...
- Senseurs et interfaçage, Arduino, Raspberry Pi, IoT
- Simulations
 - Agent base modelling et systèmes complexes
 - Automates cellulaires
 - Simpy,...
- Traitement d'image
 - particle tracking,...

From:

<https://dvillers.umons.ac.be/wiki/> - **Didier Villers, UMONS - wiki**

Permanent link:

<https://dvillers.umons.ac.be/wiki/teaching:methcalchim:start?rev=1611318230>

Last update: **2021/01/22 13:23**

