UNIVERSITÉ DE FRIBOURG, SUISSE
SERVICE DE DIDACTIQUE UNIVERSITAIRE ET COMPÉTENCES NUMÉRIQUES

Enseigner la recherche opérationnelle

entre rigueur théorique et application pratique

Travail de fin d'étude en vue de l'obtention du Certificat
en Enseignement Supérieur et Technologie de l'Éducation

Sous la direction de Dr Hervé Platteaux

Nour ElHouda TELLACHE
Département d'informatique, Université de Fribourg
2026

Je déclare sur mon honneur que mon travail de fin d'étude est une œuvre personnelle, composée sans concours extérieur non autorisé.

_____

Signature

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement le Dr Hervé Platteaux, qui a dirigé ce travail, pour sa disponibilité, son accompagnement et la qualité de sa supervision. Je lui suis particulièrement reconnaissante pour les réunions constructives que nous avons eues tout au long de ce travail, ainsi que pour ses commentaires et ses propositions, qui m'ont permis d'enrichir ma réflexion et d'améliorer progressivement ce travail. Son suivi attentif et ses conseils précieux ont été d'une grande aide dans l'élaboration de cette réflexion sur l'enseignement.

Je souhaite également adresser mes sincères remerciements à Dr Marie Lambert pour son investissement et pour tout ce qu'elle a fait pour nous tout au long de la formation. Sa disponibilité, son accompagnement et l'organisation de cette formation ont grandement contribué à rendre cette expérience enrichissante.

Enfin, je remercie vivement Prof. Philippe Genoud d'avoir accepté de faire partie du jury de ce travail et de consacrer son temps à sa lecture et à son évaluation.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à ma famille pour son soutien, sa confiance et ses encouragements tout au long de mon parcours et durant la réalisation de ce travail. Leur présence et leur soutien ont été précieux et m'ont permis d'avancer avec sérénité et persévérance.

À toutes et à tous, je tiens à exprimer ma sincère gratitude.

Table des matières

1 Introduction **4**

2 Interrelation entre théorie et pratique **4**
2.1 Les défis pédagogiques en recherche opérationnelle 5
2.2 Application au cours *Machine Scheduling : from Theory to Applications* . . 7

3 Scénario pédagogique du cours *Machine Scheduling : from Theory to Applications* **9**
3.1 Description synthétique 9
3.2 Prérequis 10
3.3 Objectifs d'apprentissage 11
3.4 Tableau chronologique du scénario pédagogique 12
3.5 Planification des activités d'apprentissages 12
3.6 Évaluation des apprentissages 14

4 Réflexion sur l'enseignement du cours *Machine Scheduling : from Theory to Applications* **15**

5 Conclusion et perspectives futures **16**

1 Introduction

Depuis mes premières études en mathématiques, j'ai toujours été attirée par les liens entre les concepts théoriques et leurs applications. Les mathématiques ne m'ont jamais semblé être une discipline constituée uniquement de notions abstraites ; j'y ai au contraire vu un langage permettant de décrire, d'analyser et de résoudre des problèmes concrets. Cette manière de les appréhender a progressivement orienté mon intérêt vers la recherche opérationnelle, discipline qui repose sur cette articulation entre théorie et pratique.

Au cours de mon parcours, j'ai également développé un intérêt pour les mécanismes de l'apprentissage. J'ai rapidement constaté que la compréhension des principes fondamentaux et des raisonnements sous-jacents favorisait une appropriation plus durable des notions. Cette observation, renforcée par les échanges avec d'autres étudiant · e · s puis par mes premières expériences d'enseignement, m'a progressivement amenée à m'interroger sur les conditions qui favorisent l'apprentissage de disciplines reposant sur la théorie.

L'enseignement de la recherche opérationnelle a constitué, à cet égard, un terrain de réflexion particulièrement riche. Cette discipline exige en effet de mobiliser conjointement les mathématiques et l'informatique afin de résoudre des problèmes pratiques, généralement liés à la prise de décision. Elle repose ainsi sur un dialogue permanent entre fondements théoriques et applications concrètes. Établir ce lien constitue également un défi pédagogique important. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail, qui vise à réfléchir aux modalités d'enseignement permettant de favoriser une interaction féconde entre ces deux dimensions.

Dans le cadre de cette réflexion, le cours *Machine Scheduling : from Theory to Applications*, que j'ai eu l'opportunité d'enseigner au semestre de printemps 2026 dans le cadre du programme de Master en informatique et informatique de gestion, constitue un terrain d'observation pertinent. Ce cours est consacré à la théorie de l'ordonnancement, l'une des branches de la recherche opérationnelle. Le fait de l'avoir préparé et enseigné en parallèle de la rédaction de ce travail m'a permis d'ajuster progressivement mon enseignement grâce aux échanges avec mon superviseur, tout en nourrissant cette réflexion par une expérience d'enseignement concrète.

Le reste de ce travail est structuré comme suit. La première section revient sur l'interrelation entre théorie et pratique dans l'enseignement, en s'appuyant sur la littérature ainsi que sur des exemples issus de la recherche opérationnelle. Elle met ensuite en évidence les principaux défis pédagogiques découlant de cette articulation. La section suivante présente le cours *Machine Scheduling : from Theory to Applications* comme étude de cas et montre comment ces défis sont pris en compte dans sa conception et son enseignement. Le scénario pédagogique du cours est ensuite détaillé, en présentant notamment les objectifs d'apprentissage, les activités proposées et les modalités d'évaluation. Enfin, une dernière section propose une réflexion critique sur ce dispositif d'enseignement et discute des perspectives d'amélioration pour les futures éditions du cours.

2 Interrelation entre théorie et pratique

L'articulation entre théorie et pratique représente un enjeu majeur dans l'enseignement et a été largement étudiée dans la littérature scientifique [5, 3].

Perry et Morris [4] définissent la théorie de la manière suivante (p. 22) :

> *"A theory is a system of concepts that explain and/or describe the object of study in a given area of research or study."*

Ainsi, la théorie peut être comprise comme un ensemble structuré de concepts permettant d'expliquer, de décrire et d'interpréter des phénomènes ou des situations dans un domaine donné.

Traditionnellement, les approches pédagogiques considèrent que les étudiant · e · s doivent d'abord apprendre la théorie avant de pouvoir l'appliquer à des situations concrètes. Cette logique a été critiquée par Neil Thompson [6], qui remet en question l'idée de commencer par des concepts théoriques abstraits avant de faire le lien avec la pratique dans l'apprentissage.

Selon Thompson, cette approche crée une séparation artificielle entre théorie et pratique, alors que notre compréhension du monde est avant tout ancrée dans des situations réelles et dans l'expérience vécue (« lived experience »). Il propose ainsi de partir de situations pratiques concrètes avant de mobiliser des apports théoriques pour donner du sens à nos expériences pratiques.

À mon avis, la relation entre théorie et pratique doit être envisagée comme bidirectionnelle. D'une part, les fondements théoriques permettent de comprendre les principes et mécanismes sous-jacents aux applications concrètes. À titre d'exemple, les probabilités, développées dès le XVII^{e} siècle, constituent aujourd'hui un pilier de nombreuses applications, notamment des modèles de langage de grande taille tels que ChatGPT, dont le fonctionnement repose largement sur des méthodes probabilistes. D'autre part, l'étude de situations réelles favorise l'appropriation des concepts théoriques en leur donnant un contexte et une finalité, tout en les reliant au réel. Ainsi, théorie et pratique apparaissent comme deux dimensions complémentaires et interdépendantes du processus d'apprentissage des connaissances dans un contexte académique.

L'enseignement de la recherche opérationnelle constitue un exemple particulièrement pertinent de cette relation bidirectionnelle entre théorie et pratique. Cette discipline mobilise simultanément des concepts mathématiques formels, des raisonnements algorithmiques et des applications concrètes orientées vers l'aide à la décision. Cette double dimension représente à la fois une richesse pédagogique et un défi didactique.

Un exemple classique de cette bidirectionnalité est celui du problème des ponts de Königsberg. La ville de Königsberg était alors composée de quatre zones terrestres, reliées entre elles par sept ponts. La question posée était de savoir s'il était possible d'effectuer une promenade en allant d'une zone terrestre à une autre par les différents ponts, de manière à traverser chacun des sept ponts exactement une fois. Cette question a conduit Euler à formaliser le problème et à introduire les bases de la théorie des graphes, notamment la notion de cycle eulérien, aujourd'hui largement utilisée pour modéliser des problèmes de parcours et de réseau.

Dans l'autre sens, des résultats théoriques issus de la programmation linéaire, tels que les variables duales, trouvent une interprétation directe dans des contextes pratiques, par exemple en économie, où elles représentent des prix marginaux ou des coûts d'opportunité associés aux contraintes d'un système d'optimisation.

2.1 Les défis pédagogiques en recherche opérationnelle

La recherche opérationnelle est une discipline qui s'appuie sur les mathématiques et l'informatique pour étudier des problèmes de prise de décision. Apparue durant la Seconde Guerre mondiale, elle consistait à modéliser des situations concrètes et à développer des algorithmes permettant de les résoudre afin d'aider à la décision. Aujourd'hui, son champ s'est élargi. Sur le plan théorique, plusieurs directions sont explorées, telles que le dévelop-

pement de modèles théoriques, l'analyse de leurs propriétés structurelles et paramétriques, l'étude de la complexité computationnelle des problèmes et la conception d'algorithmes. L'objectif est de disposer de modèles capables de représenter des situations pratiques de plus en plus complexes et de proposer des outils efficaces pour les résoudre. La recherche opérationnelle est ainsi une discipline où théorie et pratique se complètent étroitement.

Dans ce contexte, l'enseignement de la recherche opérationnelle constitue un terrain particulièrement riche mais également complexe d'un point de vue pédagogique. Cette double exigence de théorie et de pratique représente un défi majeur pour l'enseignant : présenter les fondements théoriques avec un niveau de profondeur suffisant pour permettre leur compréhension et leur maîtrise, tout en les reliant à des situations d'application concrètes afin d'en montrer la pertinence et l'utilité pratique.

Cette double exigence se traduit par plusieurs défis pédagogiques. L'un des premiers et des plus importants auxquels les étudiant · e · s sont confronté · e · s concerne le passage d'une situation concrète à sa représentation formalisée. Mon expérience d'enseignement, notamment à travers les exercices, les échanges en classe et les erreurs récurrentes observées dans les travaux des étudiant · e · s, m'a permis d'identifier cette difficulté. Cette étape demande une capacité d'abstraction importante, qui peut masquer le lien avec les situations réelles. Les étudiant · e · s peinent souvent à identifier les éléments essentiels du problème et à les exprimer dans un formalisme mathématique adapté, ce qui constitue pourtant une compétence centrale en recherche opérationnelle.

Un autre défi concerne la compréhension des méthodes de résolution des modèles. Les algorithmes sont fréquemment perçus comme des procédures techniques déconnectées du sens du problème initial. Cette perception peut limiter la capacité des apprenant · e · s à interpréter les résultats obtenus et à en évaluer la pertinence dans un contexte décisionnel réel. Afin de mettre en œuvre ces méthodes et d'accéder aux résultats issus de la modélisation et de la conception algorithmique, les étudiant · e · s s'appuient sur des outils numériques tels que des logiciels d'optimisation et des langages de programmation. Cette étape introduit une dimension supplémentaire dans l'apprentissage. Si ces outils facilitent l'obtention de solutions et permettent aux étudiant · e · s de visualiser concrètement les résultats de leur travail, ils peuvent également conduire à un effet de « boîte noire », dans lequel les étudiants exploitent des solutions sans en comprendre pleinement les mécanismes sous-jacents. L'enseignement doit donc veiller à limiter cet effet en favorisant une compréhension explicite des méthodes utilisées.

Enfin, un défi didactique important réside dans la nécessité de concevoir des situations d'apprentissage authentiques, suffisamment réalistes pour donner du sens aux concepts, tout en restant adaptées au niveau des apprenant · e · s dans un cadre pédagogique. L'articulation entre simplification des problèmes et fidélité aux situations réelles constitue ainsi un équilibre délicat à construire pour les enseignant · e · s. La simplification peut prendre plusieurs formes. Elle peut consister à réduire la complexité de l'ensemble d'un problème réel, par exemple en considérant un problème d'ordonnancement des tâches dans un système de production en supposant que les machines ne tombent pas en panne, afin de se concentrer sur l'affectation des ressources et le respect des délais. Une autre forme de simplification consiste à considérer un aspect particulier d'un problème réel afin d'introduire progressivement les concepts théoriques. Par exemple, pour introduire la notion de graphe planaire, l'enseignant peut partir d'un réseau routier comme situation concrète, montrer comment celui-ci peut être modélisé par un graphe planaire, puis s'appuyer sur cette modélisation pour introduire progressivement les propriétés théoriques de cette classe de graphes.

2.2 Application au cours *Machine Scheduling : from Theory to Applications*

Le cours *Machine Scheduling : from Theory to Applications* constitue une introduction à la théorie de l'ordonnancement, elle-même une branche de la recherche opérationnelle. Historiquement, cette branche s'est développée autour des problèmes d'ordonnancement des tâches dans les systèmes de production, au début du XX^{e} siècle. Aujourd'hui, les modèles élaborés dans ce domaine ne se limitent plus à ces problèmes et permettent de représenter des situations relevant de nombreux autres domaines, tels que la logistique, les transports, les systèmes informatiques ou encore les télécommunications, bien que leur terminologie continue de refléter leur contexte historique de développement.

Ce cours constitue un cas d'étude particulièrement pertinent pour illustrer les interactions entre théorie et applications dans l'enseignement de la recherche opérationnelle. Tout au long du cours, les étudiant · e · s découvrent la diversité des contextes d'application de l'ordonnancement, tout en mobilisant des fondements théoriques issus des mathématiques et de l'informatique, notamment l'algorithmique, la théorie de la complexité, la programmation mathématique, et la théorie des graphes. Le cours illustre ainsi la manière dont les concepts théoriques et les applications pratiques se complètent dans le cadre de l'enseignement de la recherche opérationnelle.

Les trois défis pédagogiques identifiés dans la section précédente sont directement liés à ce cours et seront analysés dans les paragraphes suivants.

Pour le défi lié à l'appropriation des modèles, les modèles abstraits étudiés dans le cadre de l'ordonnancement sont généralement introduits à partir d'exemples dans les systèmes de production. Cette approche facilite leur compréhension initiale et constitue un premier pas vers leur appropriation par les étudiant · e · s. Cependant, comme évoqué précédemment, le champ d'application de ces modèles dépasse largement les seuls problèmes d'ordonnancement dans les systèmes de production. Les étudiant · e · s peuvent alors rencontrer des difficultés à reconnaître comment des problèmes issus d'autres contextes peuvent être formulés à l'aide de ces modèles abstraits. Par exemple, le modèle de type *open shop* décrit un ensemble de machines spécialisées sur lesquelles les tâches peuvent être exécutées dans n'importe quel ordre. Ce modèle peut également être utilisé pour représenter un problème de planification dans un hôpital, où les services correspondent aux machines et le parcours des patient · e · s (consultation, analyses, radiologie, etc.) aux tâches. Afin de favoriser cette généralisation des modèles, des exemples issus de différents domaines d'application sont présentés tout au long du cours et des travaux dirigés, afin d'amener progressivement les étudiant · e · s à reconnaître les structures communes à des problèmes de nature différente.

Une fois cette première contextualisation réalisée, les notions théoriques et les algorithmes de résolution sont introduits progressivement. Cette étape fait directement écho au deuxième défi pédagogique identifié précédemment, à savoir la compréhension des méthodes de résolution. Les algorithmes sont d'abord illustrés au moyen d'exemples et d'exercices permettant d'en suivre le déroulement étape par étape. Toutefois, afin d'aller au-delà de ces exemples et de mettre en œuvre ces méthodes sur des instances de plus grande taille, les étudiant · e · s sont amenés à les implémenter sous forme de programmes informatiques. Cette activité leur permet non seulement de comprendre leur fonctionnement en pratique, mais également de confronter les propriétés théoriques des méthodes aux performances observées, notamment en termes de temps de calcul et de qualité des solutions obtenues. L'implémentation rend ainsi explicites les mécanismes de résolution,

favorise une appropriation plus active des concepts et limite le risque d'une utilisation des méthodes comme une simple « boîte noire ».

Pour le dernier défi, relatif à la construction des situations d'apprentissage, l'approche adoptée dans le cours consiste à introduire les principales notions à partir d'exemples simples, généralement issus des systèmes de production. Une fois cette première contextualisation réalisée, ces notions sont progressivement enrichies par l'introduction de nouveaux concepts théoriques, sans recourir systématiquement à de nouveaux exemples d'application. Les étudiant · e · s sont ainsi amené · e · s à établir eux-mêmes le lien entre ces concepts et la situation concrète initiale. Ainsi, pour chaque famille fondamentale de problèmes d'ordonnancement — notamment l'ordonnancement sur une machine, les machines parallèles (identiques, uniformes et non reliées) ainsi que les ateliers spécialisés tels que les *flow shop*, *open shop* et *job shop* — le cours débute par une application simplifiée permettant d'introduire les principales notions du modèle considéré. Une fois cette première contextualisation réalisée, les concepts théoriques sont progressivement développés sans nécessairement recourir systématiquement à de nouvelles applications concrètes. Dans les exercices et travaux pratiques, les étudiant · e · s sont ensuite confronté · e · s à des problèmes issus d'autres contextes d'application afin de les amener à identifier par eux-mêmes les similarités structurelles entre différentes situations et à mobiliser les modèles théoriques étudiés de manière autonome.

Pour illustrer ce point, on peut considérer le modèle le plus simple d'ordonnancement sur une machine unique, qui consiste à traiter un ensemble de tâches devant être exécutées sur une seule machine. Ce modèle peut être introduit à partir d'une situation concrète telle qu'une imprimante devant traiter différentes requêtes d'impression : la machine correspond alors à l'imprimante et les tâches aux différentes demandes. Dans un second temps, des notions plus avancées peuvent être introduites afin de se rapprocher de situations réelles, qui sont souvent plus complexes. Il s'agit notamment des temps de réglage (*setup times*) entre deux tâches, dépendant de leur ordre d'exécution, de ressources additionnelles (renouvelables ou non) nécessaires en plus de la machine, des temps d'arrivée des tâches, des dates d'échéance, ainsi que de différents critères d'optimisation tels que la minimisation du temps total de traitement ou la minimisation du nombre de tâches en retard. Ces notions peuvent être introduites sans recourir à de nouveaux exemples, en les interprétant dans le cadre de l'imprimante, par exemple le temps de réglage correspondant au temps nécessaire pour passer d'un type d'impression à un autre, comme un changement de format ou de configuration de couleur. En poursuivant l'apprentissage, les étudiant · e · s peuvent également être amené · e · s à reconnaître ces mêmes structures dans d'autres contextes d'application ne relevant pas des systèmes de production. Par exemple, un problème de tournée de livraison peut être formulé comme un problème d'ordonnancement sur une machine unique : le livreur est assimilé à la machine et les clients aux tâches. Les temps de réglage correspondent alors aux temps de déplacement entre deux clients. Cet exemple illustre à la fois le processus d'appropriation des modèles et la construction d'exemples simplifiés permettant d'introduire des notions théoriques de manière graduelle.

L'ensemble des éléments introduits dans cette section met en évidence le caractère bidirectionnel de l'enseignement de la recherche opérationnelle entre théorie et pratique. D'un côté, les situations concrètes servent à donner du sens aux notions théoriques, notamment aux modèles, et à faciliter leur appropriation. De l'autre, ces modèles, une fois formalisés, permettent de dépasser leur contexte d'origine et de structurer une grande variété de problèmes issus de domaines différents. Cette dynamique se retrouve également

dans l'apprentissage des méthodes de résolution, où les algorithmes sont à la fois étudiés de manière théorique et expérimentés concrètement par leur implémentation. Cela permet d'en comprendre à la fois le fonctionnement et les limites, ainsi que d'aider à la prise de décision dans des situations concrètes à partir des résultats obtenus et de leur analyse.

Figure 1 synthétise les principales activités d'apprentissage mises en œuvre dans le cours, leur articulation entre théorie et application, ainsi que les défis pédagogiques auxquels elles répondent.

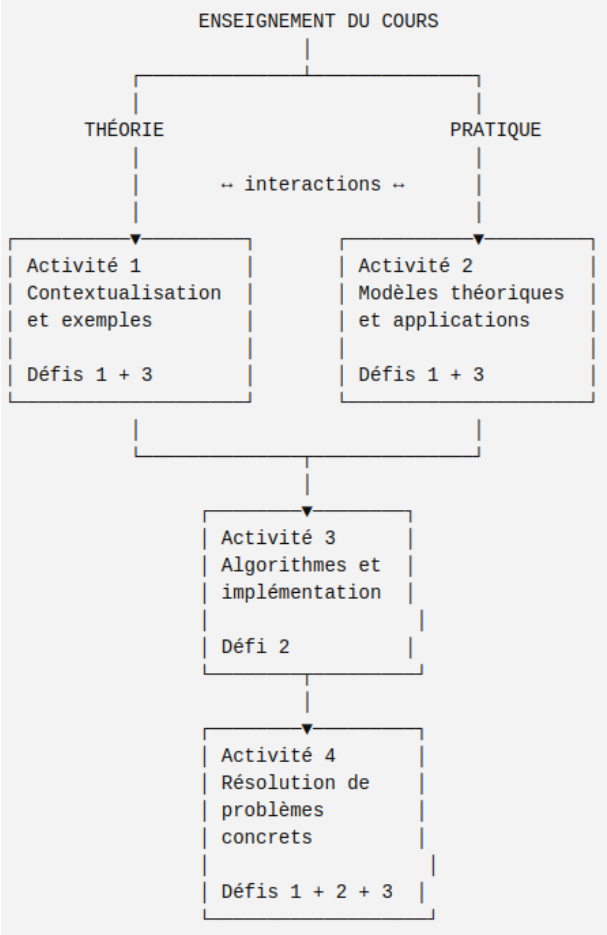


FIGURE 1 – Articulation entre les activités d'apprentissage, la théorie, les applications et les défis pédagogiques.

3 Scénario pédagogique du cours *Machine Scheduling : from Theory to Applications*

3.1 Description synthétique

Ce cours initie les étudiants aux concepts fondamentaux de l'ordonnancement, en s'appuyant sur deux dimensions complémentaires : la théorie et les applications. Une partie du cours met l'accent sur les fondements théoriques, notamment l'analyse de la complexité des problèmes d'ordonnancement et le développement d'algorithmes pour leur résolution. Une autre partie est consacrée à la mise en pratique de ces concepts : les étudiants apprendront à modéliser des problèmes concrets issus de divers domaines (production

industrielle, gestion de projets, planification d'horaires, etc.) sous forme de problèmes d'ordonnancement.

À travers des exercices et des études de cas, les étudiants apprendront à faire le lien entre des situations pratiques et leur modélisation sous forme de problèmes d'ordonnancement. Ils développeront des compétences en analyse de complexité afin de classifier les problèmes d'ordonnancement en problèmes polynomiaux ou NP-difficiles, en conception d'algorithmes en fonction de cette analyse, ainsi qu'en utilisation d'outils informatiques dédiés à leur résolution. L'ensemble de ces compétences vise à soutenir la prise de décision dans des problèmes d'ordonnancement complexes.

Inscription dans le contexte institutionnel Ce cours est ouvert aux étudiant · e · s du master en informatique de gestion et en informatique de l'Université de Fribourg, ainsi qu'aux étudiant · e · s du master conjoint en sciences informatiques suisses (universités de Berne, Neuchâtel et Fribourg).

ECTS prévus pour l'activité 5 ECTS pour les étudiant · e · s du master conjoint et 4.5 ECTS pour les autres étudiant · e · s.

Durée estimée pour l'apprenant · e

- Face à face : 3 heures/semaine (3 × 13 semaines = 39 heures par semestre)
- En ligne : /
- Travail personnel : environ 1 jour/semaine

Personnes ressources

- Enseignant · e · s : 1
- Tuteurs/tutrices : 0
- Pairs : 0
- Soutien technique : 0
- Autres : /

3.2 Prérequis

- **Prérequis techniques**
  Connaissances en théorie de la complexité, en algorithmique (méthodes exactes et approchées), en programmation mathématique et en théorie des graphes.
  Bases en programmation : Maîtrise d'un langage de programmation (Julia, Python,C++) pour la mise en œuvre des modèles et la résolution des problèmes.
  Logique et raisonnement : Capacité à formaliser des problèmes, à identifier les objectifs, les décisions à prendre et les contraintes
- **Soft skills**
  Communication claire : Capacité à présenter des résultats de manière précise et compréhensible, que ce soit à l'écrit ou à l'oral.
  Travail en équipe : Compétence en collaboration avec d'autres, notamment pour les excercices de modélisation ou d'optimisation en groupe.
- **Prérequis administratifs**
  Inscription préalable dans le programme : Vérifier que l'étudiant est inscrit dans le cursus adéquat.

Accès aux ressources informatiques : Accès aux logiciels nécessaires (Renku, JuMP, Highs) pour la modélisation et la résolution de problèmes d'optimisation, ainsi qu'à Moodle pour consulter les supports de cours, participer aux communications et utiliser toutes les fonctionnalités liées au suivi du module.

3.3 Objectifs d'apprentissage

Les principaux objectifs d'apprentissage visés dans ce cours sont de formuler des problèmes du monde réel sous forme de problèmes d'ordonnancement, d'identifier leur complexité, d'appliquer ou de proposer des algorithmes appropriés pour les résoudre, puis d'implémenter et d'évaluer ces algorithmes.

Afin de préciser les niveaux cognitifs visés, ces objectifs d'apprentissage sont déclinés ci-dessous en s'appuyant sur la taxonomie de Bloom [2, 1].

Formuler des problèmes pratiques sous forme de problèmes d'ordonnancement

— Connaître les principaux modèles d'ordonnancement de base : machine unique, machines parallèles et machines spécialisées. (Connaissance / Mémorisation / Compréhension)

— Identifier les composantes principales des problèmes pratiques d'ordonnancement afin de les relier aux modèles d'ordonnancement de base. (Application / Analyse)

— Évaluer la performance des modèles et la démarche de modélisation en ordonnancement. (Évaluation)

Identifier la complexité computationnelle des problèmes d'ordonnancement

— Comprendre les classes de complexité des problèmes d'ordonnancement de base présentés en cours (polynomiaux ou NP-difficiles). (Connaissance / Mémorisation)

— Identifier la classe de complexité de variantes de problèmes d'ordonnancement de base (Analyse).

Appliquer ou proposer des algorithmes d'ordonnancement

— Reproduire l'application des algorithmes vus en cours à des problèmes similaires à ceux déjà traités. (Connaissance / Mémorisation / Application)

— Identifier le type d'algorithme le plus adapté à un problème d'ordonnancement en fonction de sa complexité. (Analyse)

— Appliquer les algorithmes vus en cours, initialement appliqués aux problèmes d'ordonnancement de base, à des variantes de ces problèmes. (Application)

— Proposer de nouveaux algorithmes pour résoudre des variantes des problèmes d'ordonnancement de base vus en cours. (Synthèse / Évaluation)

— Évaluer les avancées récentes en matière d'algorithmes d'optimisation pour l'ordonnancement. (Évaluation)

Implémenter les algorithmes d'ordonnancement

— Implémenter les algorithmes et les modèles mathématiques de résolution des problèmes d'ordonnancement. (Application)

— Utiliser des logiciels d'optimisation pour résoudre des modèles mathématiques (HiGHS, Gurobi, CPLEX). (Application)

— Interpréter les résultats obtenus et en tirer des conclusions pour la prise de décision. (Évaluation)

Comme observé dans les objectifs détaillés, l'accent de ce cours est principalement mis sur la formulation de problèmes pratiques sous forme de problèmes d'ordonnancement ainsi que sur leur résolution algorithmique. Ces deux dimensions constituent ainsi le cœur des objectifs d'apprentissage et sont déclinées jusqu'aux niveaux les plus élevés de la taxonomie de Bloom. En revanche, l'étude de la complexité computationnelle est considérée comme un outil permettant de guider la partie méthodologique de la résolution des problèmes. Elle est donc mobilisée de manière fonctionnelle sans faire l'objet d'un approfondissement aux niveaux supérieurs de la taxonomie. L'implémentation, quant à elle, intervient après la phase méthodologique de résolution et est également située à un niveau élevé de la taxonomie de Bloom, dans la mesure où elle constitue la mise en œuvre concrète des algorithmes de résolution.

3.4 Tableau chronologique du scénario pédagogique

La réflexion présentée dans la Section 2 met en évidence l'importance d'articuler théorie et pratique dans l'enseignement de la recherche opérationnelle. Cette orientation pédagogique se traduit concrètement dans l'organisation des séances du cours *Machine Scheduling : from Theory to Applications*. Tableau 1 présente le déroulement chronologique d'une séance type de 90 minutes consacrée à l'introduction de chacun des modèles fondamentaux d'ordonnancement. Il illustre la manière dont les différentes activités proposées contribuent à l'acquisition progressive des connaissances et des compétences visées.

Lors des séances suivantes, une fois les modèles de base introduits, l'accent n'est plus systématiquement mis sur la présentation de nouvelles situations concrètes. Les étudiant · e · s sont alors amené · e · s à mobiliser les concepts déjà étudiés afin d'en identifier les applications possibles et d'en comprendre la portée pratique.

3.5 Planification des activités d'apprentissages

— **Activités en présence**

  — **Quiz diagnostique** : Semaine 1, d'une durée de 30 minutes, pour évaluer les connaissances de départ des étudiants.

  — **Séances de travaux dirigés** : 45 minutes chaque semaine pour approfondir les concepts vus en cours et travailler sur des exercices.

  — **Travail en groupe** : Un projet est assigné par groupe, identifié lors de la semaine 5 et présenté en semaine 10.

— **Activités à distance**

  — **Préparation des travaux pratiques** : Activités hebdomadaires pour renforcer les compétences de manière autonome.

  — **Préparation du projet en groupe** : Travail collaboratif à distance pour l'élaboration et la réalisation du projet de groupe.

— **Resources**

— **Supports de cours** : Les documents du cours (diapositives, un document contenant les détails expliqués en cours, livres de référence) seront fournis aux étudiant · e · s afin de leur permettre de revoir le contenu à leur rythme.

— **Travaux dirigés** : Les exercices de travaux dirigés, accompagnés de leurs solutions, seront mis à disposition des étudiants.

— **Permanence hebdomadaire** : Une heure de permanence sera organisée chaque semaine.

TABLE 1 – Scénario pédagogique d'une séance de 90 minutes

Phase	**Durée**	**Activités de l'enseignante**	**Activités des étudiant · e · s**	**Objectif pédagogique**
Introduction du problème	10 min	Présente une situation concrète d'ordonnancement et les enjeux décisionnels associés.	Analysent la situation et identifient les éléments importants du problème.	Identifier les composantes d'un problème pratique afin de le formuler sous forme d'un problème d'ordonnancement.
Formalisation du modèle	15 min	Introduit progressivement le modèle d'ordonnancement et les principales notations.	Traduisent la situation concrète en représentation formelle.	Formuler un problème pratique sous forme d'un modèle d'ordonnancement.
Développement théorique	30 min	Présente les propriétés du problème et la méthode de résolution étudiée.	Suivent le raisonnement et participent aux échanges.	Comprendre les modèles d'ordonnancement, leur complexité computationnelle et les méthodes de résolution.
Application guidée	10 min	Résout un exemple en explicitant chaque étape.	Appliquent les concepts et justifient les décisions prises.	Appliquer les algorithmes étudiés à un problème d'ordonnancement.
Implémentation ou expérimentation	15 min	Présente l'implémentation de l'algorithme ou son utilisation sur un solveur.	Testent l'approche sur une instance et analysent les résultats.	Implémenter les algorithmes et interpréter les résultats obtenus pour la prise de décision.
Synthèse et discussion	10 min	Résume les notions essentielles et ouvre sur d'autres applications.	Discutent des résultats et reformulent les acquis.	Synthétiser les acquis et ouvrir la réflexion sur les notions à venir.

3.6 Évaluation des apprentissages

Objets d'évaluation L'évaluation des apprentissages repose sur un examen intermédiaire écrit à la semaine 8 et un examen final écrit en fin de semestre, chacun d'une durée de 90 minutes. L'examen intermédiaire a principalement une fonction formative : il permet aux étudiant · e · s de se situer dans leur progression et de se familiariser avec le format et le type de questions de l'examen final, tout en me permettant d'identifier les éventuelles difficultés de compréhension et d'adapter, si nécessaire, la suite de l'enseignement. La participation à cet examen étant facultative, la note finale est calculée de manière à ce que sa prise en compte ne puisse pas pénaliser les étudiant · e · s :

$$\max\left\{\frac{2}{3}\,\text{examen final} + \frac{1}{3}\,\text{examen intermédiaire},\ \text{examen final}\right\}.$$

Ainsi, la participation à l'examen intermédiaire présente uniquement un bénéfice potentiel pour les étudiant · e · s, tout en les encourageant à profiter de cette occasion d'évaluer leur niveau de compréhension avant l'examen final.

Ces examens évaluent à la fois les connaissances théoriques acquises au cours du semestre ainsi que leur application à la résolution de problèmes d'ordonnancement.

Fonction(s) L'évaluation est certificative.

Formes et outils L'examen se compose de deux exercices distincts, chacun étant associé à plusieurs objectifs d'apprentissage du cours :

— **Exercice 1 :** Ce premier exercice comporte des questions ciblées visant principalement les deuxième et troisième objectifs d'apprentissage, à savoir l'identification de la complexité computationnelle des problèmes d'ordonnancement et l'application ou la proposition d'algorithmes d'ordonnancement. Il est noté sur 50 points.

— **Exercice 2 :** Le deuxième exercice consiste en une situation pratique dans laquelle les étudiant · e · s doivent résoudre un problème d'ordonnancement. Les questions guident progressivement les étudiant · e · s dans le processus de résolution et permettent ainsi d'évaluer les trois premiers objectifs d'apprentissage : formuler un problème pratique sous forme de problème d'ordonnancement, identifier sa complexité et appliquer ou proposer une méthode de résolution. Il est également noté sur 50 points.

Le quatrième objectif, relatif à l'implémentation des algorithmes d'ordonnancement, n'est pas évalué directement dans le cadre de cet examen écrit. Il est cependant travaillé tout au long du cours à travers la mise en œuvre des modèles et des algorithmes étudiés. Cette mise en pratique contribue à la maîtrise des trois premiers objectifs en permettant de mettre en œuvre la formulation des problèmes d'ordonnancement, les algorithmes étudiés et l'analyse de leur complexité computationnelle.

L'examen dans son ensemble est noté sur 100 points. Les notes obtenues seront ensuite converties en grades allant de 1 à 6 selon l'échelle suivante, qui a été fournie aux étudiants dès le premier cours, et ils doivent obtenir un minimum de 4.00/6 pour valider le module.

Plage de points	Grade
$[0, 10)$	1.00
$[10, 20)$	1.50
$[20, 30)$	2.00
$[30, 40)$	2.50
$[40, 50)$	3.00
$[50, 60)$	3.50
$[60, 67.5)$	4.00
$[67.5, 75)$	4.50
$[75, 82.5)$	5.00
$[82.5, 90)$	5.50
$[90, 100]$	6.00

Critères d'évaluation L'évaluation portera principalement sur la justesse des réponses. Les réponses incorrectes seront pénalisées dans la question correspondante, mais cette pénalité ne s'étendra pas aux questions suivantes, tant que la logique de résolution demeure correcte. Après la correction de l'examen, une séance de consultation sera organisée afin de permettre aux étudiant · e · s de consulter leur copie et de poser leurs questions concernant l'évaluation. Les étudiant · e · s n'ayant pas obtenu la moyenne sont autorisé · e · s à consulter leur copie. Pour ma part, j'accepte également que tout · e étudiant · e, y compris celles et ceux ayant obtenu la moyenne, puisse consulter sa copie lors de cette séance, afin de comprendre les résultats obtenus et d'échanger sur la correction de leur copie.
Feedback aux étudiant-e-s Le corrigé de l'examen sera fourni aux étudiants immédiatement après l'examen. Une fois le corrigé terminé, les notes seront publiées sur Ilias. Ensuite, une session d'une à deux heures (en fonction du nombre d'étudiants) sera organisée, où les copies pourront être consultées et des questions spécifiques concernant les réponses et l'évaluation pourront être posées.

4 Réflexion sur l'enseignement du cours *Machine Scheduling : from Theory to Applications*

Une réflexion importante concerne le choix du titre du module, *Machine Scheduling : from Theory to Applications*. Cette formulation traduit une intention initiale visant à souligner que ce cours propose des outils théoriques pour la résolution de problèmes concrets d'ordonnancement, en mettant ainsi en avant une direction allant de la théorie vers les applications. Cependant, dans le cadre de ce travail, j'ai pris conscience que cette formulation pouvait être interprétée de manière unidirectionnelle, en masquant la dynamique inverse également présente dans le cours. Dans cette perspective, des formulations qui ne privilégient pas une seule direction pourraient mieux refléter l'esprit du cours, notamment *Machine Scheduling : Theory and Applications* ou *Machine Scheduling : Bridging Theory and Applications*.

Bien que les étudiant · e · s aient montré un intérêt pour ce cours, en particulier en raison de ses champs d'application variés et des outils théoriques présentés, notamment sur le plan algorithmique, j'ai constaté qu'il serait pertinent d'introduire davantage la notion d'apprentissage dans le cadre de l'ordonnancement. Plus précisément, il serait intéressant

d'explorer comment des méthodes d'apprentissage peuvent être mobilisées pour résoudre des problèmes d'ordonnancement, en particulier dans des contextes dynamiques. Dans cette perspective, je prévois d'introduire lors des prochaines éditions du cours une partie dédiée au *online scheduling*, alors que cette année le cours était limité au cadre du *offline scheduling*. Cette évolution permettrait aux étudiant · e · s d'apprendre comment les expériences passées peuvent être exploitées pour améliorer l'ordonnancement des tâches arrivant en temps réel.

Cette évolution pourrait également contribuer à répondre aux défis pédagogiques identifiés précédemment. L'*online scheduling* offrirait davantage de situations concrètes à partir desquelles les étudiant · e · s pourraient être amené · e · s à identifier les éléments pertinents du problème et à construire eux-mêmes le modèle correspondant. L'introduction de méthodes d'apprentissage permettrait également de mieux mettre en évidence le rôle des algorithmes et de donner davantage de sens aux résultats obtenus, en montrant comment ceux-ci peuvent être exploités pour améliorer les décisions d'ordonnancement. Enfin, cette évolution est directement liée au défi consistant à trouver un équilibre entre réalisme et simplification. L'*online scheduling* offre un contexte dans lequel la notion d'apprentissage peut être introduite progressivement à partir de situations d'ordonnancement simples, avant d'aller vers des situations plus complexes. Cela permettrait de rapprocher progressivement les problèmes étudiés de situations réelles tout en maintenant un niveau de complexité adapté aux étudiant · e · s.

Enfin, l'enseignement de ce module m'a permis de développer une compréhension plus fine de la manière dont les étudiant · e · s s'approprient progressivement les notions en recherche opérationnelle. J'ai notamment constaté que leur apprentissage ne repose pas uniquement sur la compréhension des concepts théoriques, mais également sur leur capacité à faire le lien entre une situation concrète, sa formalisation et les méthodes permettant de la résoudre. Cette expérience m'a ainsi amenée à accorder une attention particulière aux trois défis identifiés précédemment : accompagner progressivement le passage du concret au formel, expliciter le lien entre les méthodes de résolution et les problèmes auxquels elles s'appliquent, et proposer des situations suffisamment réalistes tout en restant adaptées au niveau des étudiant · e · s. Elle m'a également conduite à envisager l'enseignement non pas comme une simple transmission de contenus, mais comme un processus d'adaptation continu, dans lequel les exemples, les explications, les exercices et les outils sont ajustés en fonction des difficultés rencontrées. Les évolutions du cours pourront ainsi être envisagées progressivement, en fonction des observations réalisées lors des prochaines éditions et des difficultés qui seront identifiées.

5 Conclusion et perspectives futures

Ce travail s'est intéressé à l'enseignement de la recherche opérationnelle à travers la tension entre rigueur théorique et application pratique. En s'appuyant sur la littérature et sur l'analyse des principaux défis pédagogiques, il a mis en évidence le caractère fondamentalement bidirectionnel de cette relation, dans laquelle la théorie et la pratique se nourrissent mutuellement.

L'étude du cours *Machine Scheduling : from Theory to Applications* a permis d'illustrer concrètement cette dynamique à travers un dispositif d'enseignement structuré autour de la modélisation, de l'analyse algorithmique et de l'expérimentation. L'analyse du scénario pédagogique montre comment cette articulation peut être intégrée de manière progressive dans l'apprentissage, tout en tenant compte des difficultés rencontrées par les

étudiant · e · s, notamment dans la transition entre abstraction et résolution de problèmes concrets.

Plus largement, ce travail met en évidence le rôle central de la conception pédagogique dans l'appropriation des concepts en recherche opérationnelle. L'enseignant apparaît alors comme un médiateur entre formalisation et contextualisation, chargé de construire des situations d'apprentissage permettant de donner du sens aux notions tout en préservant leur rigueur.

Enfin, plusieurs perspectives peuvent être envisagées pour prolonger cette réflexion. D'une part, l'intégration d'approches liées à l'apprentissage automatique et à l'ordonnancement en ligne (*online scheduling*) pourrait enrichir le cours en introduisant des contextes décisionnels dynamiques. D'autre part, une exploration plus systématique de méthodes pédagogiques actives, telles que l'apprentissage par projets ou par problèmes, pourrait renforcer encore le lien entre théorie et pratique. Ces pistes ouvrent la voie à une évolution continue du dispositif d'enseignement, en phase avec les développements récents de la recherche opérationnelle et des sciences de l'éducation.

Références

[1] L. W. Anderson and D. R. Krathwohl. *A taxonomy for learning, teaching, and assessing : A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives : complete edition*. Addison Wesley Longman, Inc., 2001.

[2] B. S. Bloom, M. D. Engelhart, E. J. Furst, W. H. Hill, D. R. Krathwohl, et al. *Taxonomy of educational objectives : The classification of educational goals. Handbook 1 : Cognitive domain*. Longman New York, 1956.

[3] P. Hennissen, H. Beckers, and G. Moerkerke. Linking practice to theory in teacher education : A growth in cognitive structures. *Teaching and Teacher Education*, 63 :314–325, 2017.

[4] T. Perry and R. Morris. *A critical guide to evidence-informed education*. McGraw-Hill Education (UK), 2023.

[5] K. Resch, I. Schrittesser, and M. Knapp. Overcoming the theory-practice divide in teacher education with the 'partner school programme'. a conceptual mapping. *European Journal of Teacher Education*, 47(3) :564–580, 2024.

[6] N. Thompson. Relating theory to practice, 2024. Medium blog post, accessed 14 May 2026.