

Maintenance, support et développement informatique de la plateforme de modélisation open-source MatMat

Cahier des clauses techniques particulières

Direction Exécutive Prospective et Recherche (DEPR)
Service Economie Finance (SEF)
Rédaction : Antoine Teixeira

Vendredi 11 juillet 2025 - Version n°2

TABLE DES MATIERES

1. Éléments de contexte.....	4
1.1. Les activités de l'ADEME	4
1.2. Contexte de l'étude	4
2. Les attentes de l'ADEME vis-à-vis de la prestation à réaliser	5
2.1. Finalités et objectifs	5
2.2. Périmètre et cibles de la prestation.....	6
2.2.1. Fonctionnalités et architecture logicielle existantes du modèle MatMat.....	6
2.2.2. Infrastructure logicielle : tests, documentation et mise en open source	8
2.2.3. Consolidation des fonctionnalités existantes.....	9
2.2.4. Perspectives d'évolution fonctionnelle.....	12
2.2.5. Cibles utilisateurs et perspectives d'usage.....	14
2.3. Détail de la prestation attendue	15
2.3.1. Consolidation de l'existant et soutien à la mise en open source	17
2.3.2. Développements prioritaires et accompagnement pour la Prospective 2027	17
2.3.3. Appui aux utilisateurs et préparation des évolutions futures	18
2.3.4. Développement de nouvelles fonctionnalités stratégiques	19
2.4. Prestation supplémentaire éventuelle et tranches optionnelles	21
2.4.1. Prestation supplémentaire éventuelle : Automatisation du processus de développement.....	21
2.4.2. Tranche optionnelle n°1 : Une session de formation supplémentaire.....	21
2.4.3. Tranche optionnelle n°2 : Animation de la communauté open source	22
2.4.4. Tranche optionnelle n°3 – Développement de nouvelles fonctionnalités non identifiées à ce jour	22
2.5. Critères d'exécution et spécifications techniques	22
2.5.1. Compétences et expériences attendues du prestataire	23
2.5.2. Démarches environnementales	23
3. Organisation et pilotage de la prestation.....	24
3.1. Encadrement et suivi de la prestation.....	24
3.2. Calendrier de réalisation des prestations.....	24
4. Références	26

GLOSSAIRE

ADEME	Agence de la transition écologique
AIE	Agence Internationale de l'Énergie
CGDD	Commissariat Général au Développement Durable
CGE	Computable General Equilibrium (Équilibre général calculable)
CIREN	Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement
DEC	Direction Economie Circulaire
DEPR	Direction Exécutive Prospective et Recherche
DGEC	Direction Générale de l'Energie et du Climat
DOI	Digital Object Identifier
EE-IO	Environmentally Extended Input-Output
EPIC	Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial
GES	Gaz à Effet de Serre
HEM	Hypothetical Extraction Method
INSEE	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
MatMat	Matrices Matières
MFA	Materials Flow Analysis
MRIO	Multi-Regional Input-Output
PEP8	Python Enhancement Proposal 8 (standard de style de code Python)
SDA	Structural Decomposition Analysis
SEF	Service Economie Finance
SMASH	Société de Mathématiques Appliquées et de Sciences Humaines
SNAC	Single-country National Accounts Consistent
SNBC	Stratégie Nationale Bas-Carbone
SRIO	Single-Region Input-Output
TEE	Tableau Économique d'Ensemble
WEO	World Energy Outlook

1. Éléments de contexte

1.1. Les activités de l'ADEME

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un Etablissement public à caractère industriel et commercial (EPIC) placé sous la tutelle du [ministère en charge de l'environnement](#), du [ministère en charge de l'énergie](#) et du [ministère en charge de la recherche](#).

Pour en savoir plus, nous vous invitons à consulter le site de l'ADEME : www.ademe.fr

1.2. Contexte de l'étude

L'ADEME développe depuis 2018 la plateforme MatMat de modélisation prospective Entrées-Sorties, conçue pour évaluer les impacts environnementaux et socio-économiques de scénarios de transition à l'échelle nationale¹⁻³. Codé en Python, MatMat repose sur une architecture logicielle modulaire orientée objets, couplée à un ensemble de bases de données à haute résolution, intégrant à la fois des statistiques historiques et des résultats de modélisations prospectives. Prochainement publié en open source sous licence libre de type CeCILL, sur GitHub et sous DOI sur Zenodo, le modèle a d'ores et déjà donné lieu à plusieurs publications scientifiques⁴⁻⁶ et applications institutionnelles accessibles en libre accès, notamment une évaluation des empreintes carbone et matières des scénarios Transition(s) 2050 de l'ADEME⁷.

Initialement conçu pour soutenir des travaux prospectifs de recherche sur les empreintes carbone et matières, MatMat est aujourd'hui utilisé par l'ADEME comme un outil d'aide à la décision publique, par exemple dans le cadre de la révision de la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC-3). Le modèle suscite un intérêt croissant, tant en interne qu'auprès d'autres institutions publiques partenaires et d'acteurs académiques. Cette dynamique implique une montée en charge des usages et un élargissement des attentes, en termes de transparence et de réutilisation. En parallèle, une réflexion est engagée pour étendre son périmètre fonctionnel et produire des évaluations prospectives multidimensionnelles, combinant indicateurs environnementaux et socio-économiques.

De janvier 2024 à juin 2025, l'ADEME a engagé une refonte complète du code source et de l'architecture logicielle du modèle. Ce travail a été mené par un prestataire externe, ingénieur en développement logiciel, en lien étroit avec le chef de projet de l'ADEME, à l'origine de la conception et du développement du modèle.

Cette collaboration a permis de mettre en synergie les compétences métiers et les compétences en développement informatique afin de répondre à trois objectifs principaux :

1. Garantir la transparence et la reproductibilité des analyses produites, conformément aux standards de la recherche publique,
2. Renforcer la cohérence et la lisibilité du code source pour faciliter son appropriation par de nouveaux utilisateurs,
3. Assurer la testabilité, la stabilité et la maintenabilité du modèle, en vue de son extension progressive à de nouveaux besoins.

Dans la perspective notamment du renouvellement de l'exercice prospectif de l'ADEME à horizon 2027, le futur marché s'inscrira dans la continuité de cette démarche, avec pour objectifs d'assurer la maintenance du modèle, de poursuivre son développement évolutif, de soutenir les utilisateurs et de structurer durablement la plateforme comme un bien commun collaboratif.

2. Les attentes de l'ADEME vis-à-vis de la prestation à réaliser

2.1. Finalités et objectifs

La prestation visera à accompagner l'ADEME dans la poursuite et la consolidation de sa démarche engagée autour du modèle MatMat, fondée sur la transparence, l'ouverture du code source, ainsi que la robustesse et la modularité de son architecture logicielle. Trois grands objectifs structurent la prestation :

1. **Soutenir la diffusion et l'appropriation de l'outil**, en assurant un appui technique à sa prise en main et à son utilisation, en interne à l'ADEME au sein de la **Direction Économie et Prospective (DEPR)** et de la **Direction Économie Circulaire (DEC)** comme par les institutions partenaires (CGDD, CIRED, DGEC, INSEE, SMASH, etc.). Le prestataire pourra également contribuer à l'animation de la plateforme collaborative GitHub, notamment par des échanges et un soutien technique aux utilisateurs non identifiés à ce jour.
2. **Assurer la maintenance corrective, préventive et évolutive du code source**, en consolidant et en enrichissant les bonnes pratiques de développement logiciel déjà mises en place. Cela inclut la correction de dysfonctionnements, l'adaptation aux évolutions techniques (dépendances, formats de données...), l'amélioration continue de l'architecture logicielle en collaboration avec le chef de projet ADEME, ainsi que la gestion du dépôt GitHub.
3. **Poursuivre le développement du modèle** en réponse aux besoins exprimés par le chef de projet ADEME, ou identifiés par les utilisateurs (internes, partenaires, communauté GitHub). Ces évolutions peuvent inclure la création de nouveaux modules et packages, l'adaptation de fonctionnalités existantes ou l'optimisation des performances. L'ensemble des développements devra à minima être documenté et validé selon les processus existants.

Le prestataire devra proposer des méthodologies claires, structurées et transposables, couvrant l'ensemble du cycle de vie du modèle :

- La maintenance du code source.
- La gestion collaborative des développements et des contributions externes.
- La documentation et les tests.
- L'analyse des besoins métiers vis-à-vis des nouveaux développements envisagés et leur traduction en spécifications fonctionnelles, jusqu'à leur intégration dans l'architecture logicielle existante.

2.2. Périmètre et cibles de la prestation

2.2.1. Fonctionnalités et architecture logicielle existantes du modèle MatMat

Fonctionnalités actuelles du modèle

Le modèle MatMat propose un cadre modulaire d'analyse Entrées-Sorties (EE-IO), conçu pour évaluer les impacts environnementaux et socio-économiques associés à des scénarios de transition à l'échelle nationale, en intégrant explicitement les chaînes de valeur mondiales. Il vise à outiller les décideurs publics et les chercheurs dans l'évaluation prospective des politiques de décarbonation, d'efficacité matière et de transition écologique. Parmi ses principales fonctionnalités :

1. **Représenter de manière cohérente les flux monétaires, physiques et environnementaux** entre secteurs, grâce à une approche multicouche permettant une évaluation conjointe des dimensions environnementales et socio-économiques.
2. **Estimer des empreintes environnementales nationales** via une approche SNAC (Single-country National Accounts Consistent), qui combine une modélisation détaillée de l'économie domestique (tables SRIO) avec une représentation du reste du monde à travers un cadre MRIO (Multi-Regional Input-Output).
3. **Endogénéiser le capital** grâce à l'intégration de matrices d'investissement, afin de capturer les émissions indirectes associées à la formation de capital dans les secteurs de la demande finale (logement, mobilité, etc.).
4. **Identifier les contributions clés des empreintes environnementales** dans les chaînes de valeur mondiales et nationales, via l'implémentation de la méthode **HEM** (Hypothetical Extraction Method), qui simule le retrait d'activités économiques spécifiques.

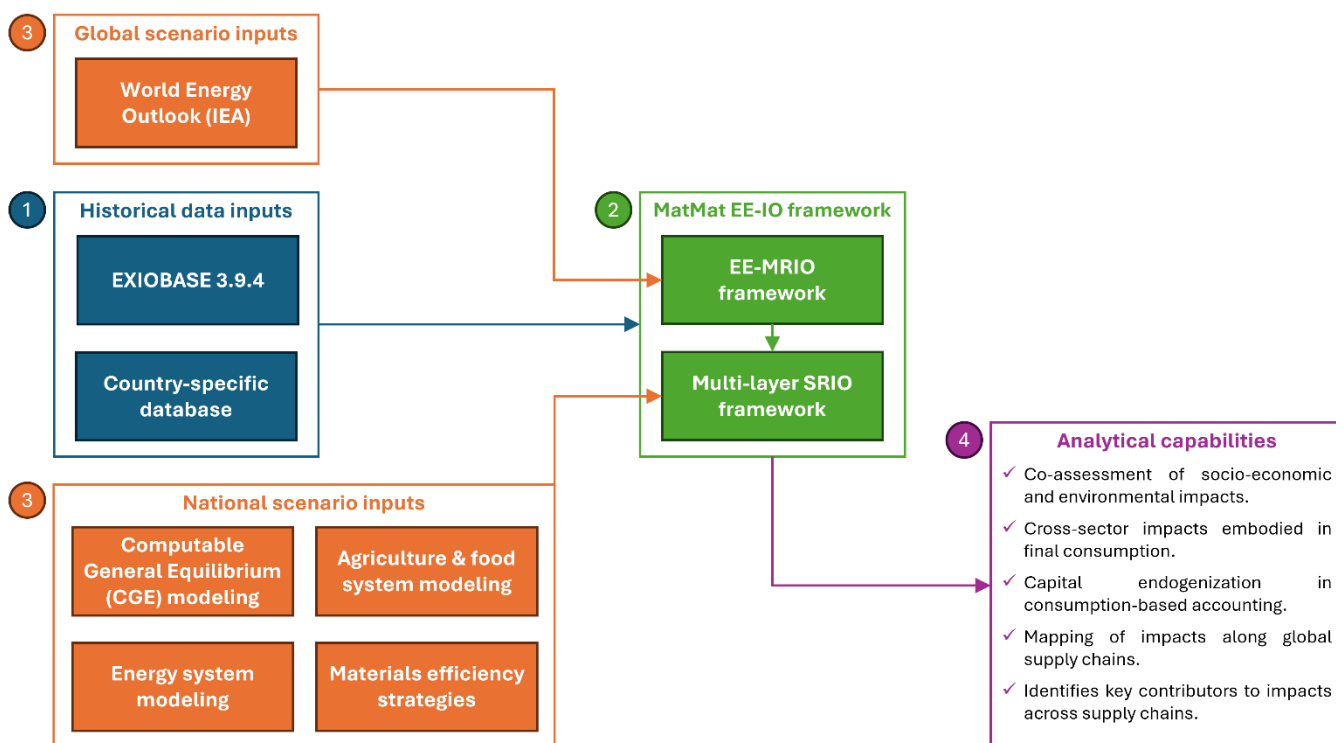


Figure 1 : Workflow général du modèle MatMat : de l'intégration des données à l'analyse des scénarios³.

Ces fonctionnalités sont en grande partie opérationnelles, mais certaines nécessitent encore une consolidation, ou une intégration complète dans la version refondue du modèle. Elles s'appuient sur une architecture modulaire composée de quatre blocs fonctionnels, illustrés à la Figure 1 :

1. **Données historiques** : le modèle intègre et réconcilie deux sources de données pour la calibration historique : (i) la base de données environnementale multirégionale EXIOBASE, et (ii) des données au pays étudié, permettant une adaptation fine à la structure sectorielle nationale et aux statistiques officielles.
2. **Cadre EE-IO modulaire** : le cœur du modèle combine deux composants : (i) un cadre EE-MRIO décrivant les échanges internationaux et les chaînes d'approvisionnement mondiales, et (ii) un cadre SRIO représentant de manière détaillée l'économie nationale.
3. **Intégration de scénarios globaux et nationaux** : le modèle permet de simuler des scénarios prospectifs via des perturbations sur les coefficients techniques, les échanges commerciaux, la demande finale ou les facteurs d'émission. Il intègre : (i) des scénarios globaux issus notamment du World Energy Outlook (WEO) de l'AIE, et des scénarios nationaux provenant de modèles sectoriels français (équilibre général calculable (CGE) comme ThreeME, énergie, agriculture et alimentation, circularité et efficacité matière).
4. **Capacités analytiques** : le modèle permet de quantifier les impacts environnementaux et socio-économiques des scénarios simulés. Il peut notamment : (i) estimer les empreintes environnementales des biens et services de la demande finale ; (ii) identifier les secteurs clefs dans les chaînes d'approvisionnement déterminants ces empreintes ; (iii) comparer différents scénarios en termes de durabilité environnementales.

Architecture logicielle existante

Le modèle MatMat s'appuie sur une architecture logicielle modulaire, orientée objets, développée en Python (version 3.11). Alignée sur les principes de l'analyse Entrées-Sorties (EE-IO), cette architecture vise à garantir la transparence, la testabilité et la maintenabilité du code, tout en facilitant sa réutilisation dans différents contextes nationaux et scénarios prospectifs, ainsi que son extensibilité à de nouvelles fonctionnalités.

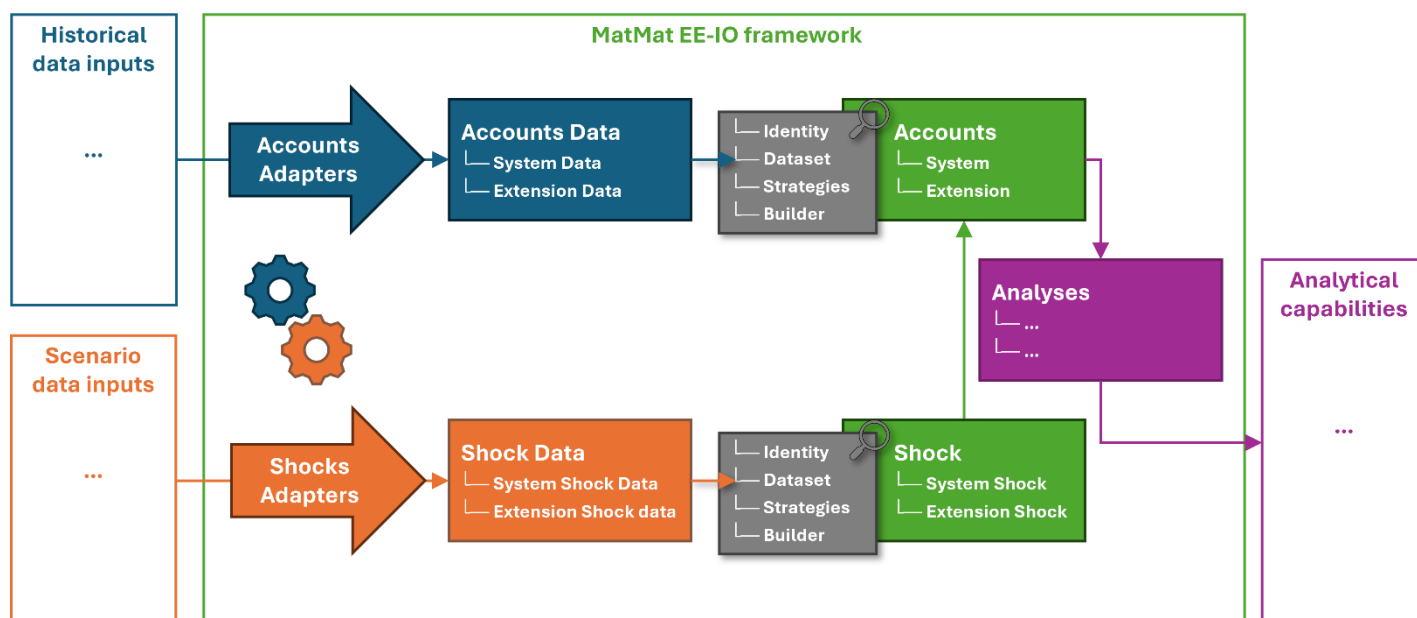


Figure 2 : Schéma simplifié de l'architecture logicielle du modèle MatMat³.

L'architecture distingue cinq grandes composantes fonctionnelles, illustrées à la Figure 2 :

- **Adapters** : assurent la conversion, la mise en cohérence et le formatage des données d'entrée (historiques ou issues de scénarios) vers une structure normalisée compatible avec le cœur du modèle.
- **Data classes** : définissent des interfaces de données stables entre le cœur du modèle et les différents ensembles de données d'entrée.

- **Accounts** : représentent l'état d'un système économique à travers une structure Entrées-Sorties, enrichie d'extensions environnementales et socio-économiques.
- **Shocks** : structurent les perturbations exogènes appliquées aux **accounts**, permettant de simuler des scénarios de transition.
- **Analyses** : regroupent les modules qui orchestrent la mise en œuvre du modèle selon différents cas d'usage, et automatisent les traitements analytiques réalisés à ce jour.

Chaque bloc fonctionnel est structuré en modules homogènes, favorisant la robustesse et la cohérence d'ensemble. Ces modules internes incluent notamment :

- **Identity** : définit l'identifiant et les métadonnées de chaque entité manipulée dans le modèle (année de simulation, pays étudié, extensions mobilisées, etc.).
- **Dataset** : centralise l'ensemble des données propres à chaque entité dans un format standardisé.
- **Strategies** : permet d'implémenter et de sélectionner différentes méthodes de calcul (par exemple, une résolution avec ou sans endogénéisation du capital). Cette approche facilite l'évolution du modèle sans compromettre la stabilité.
- **Builder** : assure l'instanciation d'objets complexes composés de plusieurs sous-composants interdépendants (données, stratégies, identifiants, etc.).

2.2.2. Infrastructure logicielle : tests, documentation et mise en open source

Au-delà de l'architecture logicielle décrite précédemment, le modèle MatMat s'appuie sur une infrastructure de développement déjà bien structurée, incluant des tests automatisés, une documentation technique générée automatiquement, et un processus de mise en open source en cours de formalisation. Une première tâche de la prestation attendue visera à consolider ces fondations, tout en assurant leur maintien au fil des évolutions du modèle (maintenance, intégration de développements existants, ou ajouts de nouvelles fonctionnalités).

Couverture des tests

Le cœur du modèle, incluant les packages accounts, shocks et les classes de données, bénéficie d'une bonne couverture de tests unitaires développés via pytest. Environ 80 % du code de ces packages est couvert par des tests unitaires. Toutefois, d'autres composants du modèle, tels que les adapters (traitement des données d'entrée) et les classes d'analyses (mise en œuvre d'applications spécifiques du modèle), ne sont pas encore couverts par des tests automatisés, ce qui limite la couverture globale à environ 50 %.

En parallèle, des tests d'intégration sont en place pour le package accounts, et des tests fonctionnels permettent de vérifier l'exécution complète du workflow sur différents systèmes d'exploitation (Windows, MacOS, Linux).

Documentation technique

Une documentation technique substantielle est d'ores et déjà disponible. Elle repose sur des docstrings conformes au standard PEP 8, et est automatiquement générée à l'aide de l'outil Sphinx, aux formats HTML, LaTeX et PDF. Cette documentation couvre l'ensemble de l'architecture logicielle, bien qu'elle soit actuellement plus structurée et plus complète pour les packages accounts et shocks que pour les adapters et les modules d'analyse. Des compléments restent donc nécessaires dans le cadre de la prestation attendue pour assurer une couverture homogène du code.

En complément, cinq tutoriels au format Markdown guident les utilisateurs dans les cas d'usage récurrents :

- Mise à jour ou création d'adapters selon une structure prédéfinie.

- Ajout de nouvelles données au modèle, de nature et de structure différentes ou identiques à l'existant.
- Intégration de nouvelles stratégies de calcul dans les extensions ou le système.
- Mise en œuvre complète du modèle sur un cas d'étude.

Un document complémentaire détaillant l'architecture logicielle est en cours de rédaction, et sera annexé à un article scientifique prévu pour publication début 2026, en appui à la mise en libre accès du modèle.

L'ensemble de cette documentation sera transmis au prestataire retenu en début de marché pour faciliter la prise en main technique.

Mise en open source et gestion du dépôt Github public

Le modèle est actuellement hébergé sur un dépôt GitHub privé, avec l'historique complet des développements. Une version stable (v1.0.0) est en cours de consolidation pour publication sous licence CeCILL, sur un nouveau dépôt GitHub public et sous DOI via Zenodo. Ce dépôt n'inclura pas l'historique de développement.

La publication en open source est prévue pour début 2026. Le soutien du prestataire est attendu dès le lancement du marché pour finaliser et fiabiliser cette mise en ligne. En parallèle, une attention particulière sera portée à la mise en place d'une gestion collaborative du dépôt public, facilitant les contributions externes et s'inscrivant dans une logique de plateforme ouverte et pérenne.

Le dépôt existant intègre déjà les éléments fondamentaux pour un projet open source :

- Un fichier README.md.
- Un fichier CONTRIBUTING.md (à compléter et adapter selon les contributions futures).
- Un fichier CHANGELOG.md.
- Les fichiers pyproject.toml et/ou requirements.txt listant les dépendances.
- Le choix d'une licence libre (CeCILL).

L'intégration continue est assurée via GitHub Actions, qui déclenche automatiquement :

- Les tests unitaires à chaque push ou pull request sur la branche principale (master).
- Des tests fonctionnels de compatibilité sur trois environnements (Windows, macOS, Linux).

2.2.3. Consolidation des fonctionnalités existantes

Le modèle MatMat repose sur une architecture modulaire comprenant plusieurs blocs fonctionnels. Si le cœur du modèle (accounts, shocks, et data classes) est aujourd'hui stabilisé, certains composants périphériques nécessitent une phase de consolidation. La prestation attendue visera à renforcer leur robustesse, leur documentation, leur testabilité et leur maintenabilité.

Deux cas de figure motivent cette consolidation :

- Certaines fonctionnalités ont d'ores et déjà été complètement ou partiellement intégrées dans la version refondue du modèle, mais nécessitent une structuration plus rigoureuse, une documentation complète et une meilleure couverture de tests pour être pleinement opérationnelles dans le nouveau cadre.
- D'autres fonctionnalités, bien qu'utilisées dans des travaux antérieurs, n'ont pas encore été réintégrées dans la version refondue. Elles existent sous forme de scripts monolithiques et procéduraux, peu compatibles avec l'architecture objet actuelle, et devront être réécrites ou réorganisées avant leur intégration.

Cette phase de consolidation portera en priorité sur trois blocs fonctionnels essentiels :

1. Les adapters, qui assurent l'intégration et la mise en forme des données d'entrée.
2. Les classes d'analyse, qui encadrent les différents cas d'usage du modèle.
3. Le package de gestion des niveaux d'agrégations sectorielle et régionale, central pour assurer la mise en cohérence entre les données d'entrée, les scénarios de chocs et la granularité des analyses.

La consolidation attendue dans le cadre de cette prestation revêt un caractère stratégique. Elle vise à fiabiliser le modèle en vue de deux échéances majeures : (i) la publication en open source d'une version stable v1.0.0 début 2026 ; (ii) son utilisation opérationnelle dans le prochain exercice de prospective de l'ADEME, à partir de novembre 2025 et tout au long de l'année 2026. L'un des objectifs clés est de limiter autant que possible la période de cohabitation entre l'ancienne et la nouvelle version du modèle, en accélérant la stabilisation et la montée en maturité de la version refondue.

Consolidation des adapters d'accounts

Pour calibrer la majeure partie des évaluations existantes, un travail a été mené afin de réconcilier la base de données MRIO EXIOBASE avec des statistiques nationales spécifiques au pays étudié au format SRIO (Single-Region Input-Output).

À ce jour, seul un adapter pour convertir la base de données EXIOBASE dans un format compatible avec le modèle a été formalisé au sein de la nouvelle architecture. Cet adapter permet de sélectionner l'année, le niveau d'agrégation sectorielle et régionale, ainsi que les extensions environnementales et socio-économiques à intégrer (émissions de GES, extraction de matières premières, valeur ajoutée, emploi, usage des sols, consommation d'eau). Ce composant, bien que fonctionnel, nécessite une consolidation sur plusieurs plans dans le cadre de cette prestation :

1. Amélioration de sa robustesse face à différents cas d'usage.
2. Couverture de tests automatisés.
3. Documentation technique (docstrings) et utilisateur (tutoriel).

Le travail de traduction des statistiques nationales n'a pas été intégré à la nouvelle version du modèle à ce jour. Il sera question de le réintégrer dans le cadre de cette prestation. Il est présent sous forme de script procédural monolithique dans une ancienne version du modèle. Ce travail de calibration sur le cas de la France a reposé sur plusieurs opérations de mise en cohérence et d'hybridation :

1. Les usages énergétiques issus des extensions environnementales d'EXIOBASE, exprimés en unités physiques, ont été intégrés dans le système SRIO en remplacement des usages énergétiques exprimés initialement en unités monétaires. Des corrections supplémentaires issues des bilans énergétiques d'Eurostat sont également réalisés.
2. L'hybridation sur les matières premières a été réalisée en croisant les données d'extraction de matières d'EXIOBASE avec les comptes de flux de matières d'Eurostat.
3. Des données issues de l'ADEME et d'Eurostat ont permis d'hybrider les matériaux de base, notamment en dissociant les matériaux primaires et secondaires.
4. Enfin, la base KLEMS a été mobilisée pour construire les matrices de flux de capital pour la France et les régions du reste du monde, en décomposant l'investissement selon un format matriciel carré.

Consolidation des adapters de shocks

Tous les adaptateurs nécessaires à la mise en œuvre complète des scénarios prospectifs (scénarios globaux, modélisations sectorielles et nationales) sont aujourd'hui partiellement développés. Ils devront être consolidés dans le cadre du marché.

Certains adaptateurs déjà présents dans la version refondue du modèle devront être restructurés et documentés selon la même logique que celui développé pour EXIOBASE. C'est notamment le cas :

1. De l'adapter de traduction des résultats issus de la modélisation en équilibre général calculable (CGE) avec le modèle ThreeME.
2. De l'adapter intégrant les scénarios énergétiques globaux du World Energy Outlook (WEO) de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE).
3. De l'adapter de traitement des bilans énergétiques et des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) pour la scénarisation des gains domestiques d'efficacité énergétique et carbone.

Un point d'attention particulier concerne le couplage amont et aval avec le modèle ThreeME. Des adaptateurs spécifiques sont en effet nécessaires à la fois pour intégrer les sorties de ThreeME dans MatMat, et pour permettre en retour l'exploitation des résultats de MatMat dans ThreeME. Ces interfaces devront être fiabilisées.

Par ailleurs, d'autres expertises mobilisées dans les scénarios – comme celles liées à l'agriculture ou au recyclage, sont actuellement traduites en hypothèses à l'aide de fichiers Excel, combinés à une interface semi-manuelle de remplissage des objets de chocs formalisés sous forme d'un adaptateur. Ce processus devra être automatisé et structuré sous forme d'adaptateurs dédiés pleinement intégrés au sein du modèle.

Consolidation des classes d'analyse

Plusieurs types d'analyses sont d'ores et déjà intégrés dans la version refondue du modèle, notamment :

- L'évaluation des empreintes environnementales par poste de consommation finale.
- La prise en compte du capital physique dans ces analyses via l'endogénéisation de la matrice d'investissement.

D'autres types d'analyses, bien que formalisés dans une version antérieure du modèle, n'ont pas encore été entièrement réintégrés. Cela concerne en particulier :

- L'analyse de la structuration des chaînes de valeur et la ventilation des impacts environnementaux le long de ces chaînes, à l'aide de diagrammes de Sankey.
- L'identification des principaux contributeurs aux impacts environnementaux le long des chaînes de valeur, à travers la méthode d'extraction hypothétique (HEM).

Leur réintégration est amorcée mais devra être finalisée et consolidée dans le cadre de cette prestation.

Consolidation du package de gestion des niveaux de détail sectoriel et régional

Un package transversal est dédié à la gestion des niveaux d'agrégation sectorielle et régionale, ainsi qu'à la conversion entre ces différents niveaux pour garantir la cohérence des données mobilisées dans le modèle. Ce composant joue un rôle central dans l'intégration des expertises hétérogènes, en permettant d'articuler les données historiques, les scénarios globaux et les hypothèses sectorielles selon des granularités variées.

Déjà présent dans une version préliminaire du modèle actuel, ce package manque toutefois de flexibilité, de documentation et de tests. Il devra être consolidé pour faciliter les couplages entre expertises multiples, améliorer l'interopérabilité et limiter les traitements manuels.

2.2.4. Perspectives d'évolution fonctionnelle

Au-delà des consolidations décrites précédemment, le modèle MatMat a vocation à intégrer de nouvelles fonctionnalités structurantes, afin d'enrichir ses capacités d'analyse et d'étendre son champ d'application. Ces évolutions permettront notamment de mieux répondre aux besoins des utilisateurs internes et partenaires, d'élargir les cas d'usage couverts, et de renforcer l'utilité du modèle pour l'évaluation des stratégies de transition écologique.

Chaque développement fera l'objet d'une démarche rigoureuse, fondée sur une séquence standardisée :

- Analyse des besoins métiers,
- Formalisation en spécifications fonctionnelles,
- Implémentation dans l'architecture logicielle existante,
- Documentation et tests.

Cette méthode étant récurrente et transversale, une attention particulière sera portée à son outillage et à son automatisation. Les propositions visant à fiabiliser et accélérer ce cycle de développement, notamment à travers le recours à des outils d'intelligence artificielle ou des frameworks d'ingénierie logicielle avancés, seront valorisées dans l'analyse des offres. En particulier, les approches facilitant la traduction systématique des besoins métiers en code testable, modulaire et documenté feront l'objet d'un intérêt spécifique.

Les perspectives d'évolution détaillées ci-après correspondent aux besoins identifiés à ce jour, à titre indicatif. Cette feuille de route est ouverte et évolutive : d'autres besoins pourront émerger au fil de la prestation, selon les usages effectifs du modèle et les priorités de l'ADEME. Leur mise en œuvre devra respecter les principes exposés dans les précédentes sections, notamment en matière de lisibilité, de testabilité et de maintenabilité du code. Chaque évolution devra également s'accompagner de la mise à jour des tests automatisés, de la documentation technique et des guides utilisateurs ou contributeurs.

Amélioration des capacités d'analyse environnementale

Un premier axe d'évolution fonctionnelle vise à enrichir les capacités d'analyse environnementale du modèle MatMat. L'objectif est de faciliter l'interprétation et la communication des résultats à travers le développement de post-traitements adaptés, de visualisations graphiques interactives ou statiques, et l'intégration de méthodologies d'analyse avancées.

Deux types d'analyses à explorer et renforcer sont envisagées :

- La Structural Decomposition Analysis (SDA), appliquée à des données historiques, permettra de décomposer les variations passées des empreintes environnementales en différents facteurs explicatifs (évolution des niveaux d'activité, productivité, effets de substitution, délocalisation, etc.). Cette approche vise à mieux comprendre les dynamiques passées et à en tirer des enseignements pour l'avenir.
- La décomposition des variations projetées dans les scénarios prospectifs, afin d'évaluer les contributions relatives de différents leviers de transition : population, niveau de vie (demande finale par habitant), sobriété (réduction des volumes de consommation par poste), efficacité énergétique et matière, économie circulaire (recyclage, durabilité, réemploi), commerce international (structure géographique des échanges), relocalisation (production locale vs importée), changement technologique, etc. Cette approche vise à améliorer la lisibilité et l'explicabilité des analyses de scénarios produites avec MatMat.

L'identification précise des besoins analytiques, tant en termes de traitements que de formats de restitution, sera menée en étroite collaboration avec les équipes de l'ADEME, afin de garantir la pertinence et l'utilité opérationnelle des développements dans la perspective d'une mobilisation de ces développements au sein du prochain exercice de prospective.

Représentation des interdépendances entre composantes

À ce jour, les extensions environnementales et socio-économiques du modèle MatMat sont connectées au système de manière unidirectionnelle : elles dépendent des résultats du système pour leurs calculs, mais n'ont aucun effet en retour sur ses paramètres ou sur d'autres extensions. Cette architecture limite la capacité du modèle à représenter des effets croisés, des interactions systémiques ou des boucles de rétroaction.

L'objectif de ce développement est de faire évoluer les méthodes de calcul du modèle afin d'introduire des interdépendances explicites entre composantes, notamment entre le système productif et les extensions, à travers des stratégies de calcul globales au niveau des accounts. Cela impliquera de repenser la logique de propagation des effets à l'intérieur du modèle, en intégrant des mécanismes de rétroaction cohérents avec la structure modulaire existante.

Exemples d'applications envisagées :

1. Scénarisation conjointe de la demande de transport et des consommations énergétiques associées, en lien avec les émissions de GES.
2. Endogénéisation alternative du capital, via la consommation de capital fixe incluse dans la valeur ajoutée.
3. Modélisation d'effets croisés entre extensions environnementales (émissions de polluants, pressions sur l'eau ou les sols) et paramètres techniques du système productif (coefficients techniques).

Extension à une approche en équilibre général calculable simplifiée

L'un des axes structurants d'évolution fonctionnelle du modèle MatMat consiste à explorer son extension progressive vers une approche d'équilibre général calculable (CGE) simplifiée. Il s'agit de dépasser certaines limites de l'approche Entrées-Sorties actuelle en introduisant des mécanismes d'ajustement économique, une meilleure cohérence comptable, et une articulation renforcée entre les dimensions physiques, monétaires et environnementales.

Cette extension poursuit trois objectifs complémentaires :

- Améliorer la formalisation multicouche (physique, monétaire et environnementale) du modèle MatMat.
- Renforcer l'articulation avec le modèle ThreeME, fondé sur une structure CGE détaillée.
- Préfigurer une version hybride du modèle MatMat, intégrant certaines briques conceptuelles et méthodologiques de type CGE, sur des cas d'étude ciblés.

En effet, l'approche Entrées-Sorties actuelle de MatMat repose sur des hypothèses fortes, comme :

- Améliorer la formalisation multicouche (physique, monétaire et environnementale) du modèle.
- Renforcer l'articulation avec le modèle CGE ThreeME.
- Préparer une extension progressive du modèle MatMat vers un formalisme de type CGE simplifié.

En comparaison, les modèles d'équilibre général calculable (CGE) s'appuient sur :

- Des prix endogènes résultant de mécanismes d'ajustement entre l'offre et la demande.

- Une cohérence comptable rigoureuse entre les dépenses et les revenus pour chaque agent économique (ménages, entreprises, administrations publiques, reste du monde, etc.).
- Des équations de comportement modélisant les arbitrages économiques (ex : élasticité-prix de la demande ou de l'offre).

Dans cette perspective, la démarche proposée consiste en une montée en complexité progressive. Il s'agira d'étendre la structure actuelle de MatMat, composée d'un système Entrées-Sorties exprimé en unités mixtes (monétaires en prix de base et/ou physiques) complété par des extensions environnementales et socio-économiques, en y intégrant à minima deux nouveaux objets fondamentaux :

- Des matrices de prix (par branche et par produit), décomposant les prix d'acquisition en prix de base, taxes, subventions, marges de commerce et de transport. Ces matrices permettront d'assurer la cohérence entre les flux physiques et monétaires du modèle.
- Un tableau d'économie d'ensemble, structurant de manière matricielle les principaux flux économiques et assurant la cohérence entre les dépenses et les revenus pour chaque agent institutionnel. Ce tableau pourra servir de socle pour une convergence future avec les modèles CGE ou pour la construction d'indicateurs macroéconomiques étendus.

En parallèle, il s'agira de proposer une méthode de résolution d'équilibre statique par le développement d'une interface dédiée à la résolution d'un système d'équations décrivant un équilibre simplifié (prix, comportements, arbitrages). Cette résolution pourra être appliquée à des cas d'étude spécifiques existant.

Un cas d'étude appliqué à la France dans le secteur du recyclage a d'ores et déjà permis de préfigurer cette extension. Les jeux de données nécessaires ont été constitués, notamment à partir d'un travail de désagrégation sectorielle réalisé à partir des tables Entrées-Sorties et de bases de données de l'ADEME. Dans le cadre du marché, il s'agira également de reconstruire l'adapter ayant permis de produire cette base de données, en s'appuyant et en consolidant sur les méthodes de désagrégation de données déjà disponibles dans MatMat.

Intégration d'une modélisation dynamique des flux de déchets

Le modèle MatMat, dans sa version actuelle, repose sur une approche statique, sans prise en compte de la dimension temporelle des flux physiques. Cette limite empêche notamment la représentation de l'évolution dans le temps des stocks de produits finis, des flux intertemporels de déchets liés à la durée de vie des produits et des boucles de rétroaction temporelles, par exemple via le recyclage. Pour dépasser cette limite, une extension dans une logique de MFA dynamique (dynamic Material Flow Analysis) est envisagée.

L'objectif est d'introduire une modélisation dynamique des flux de matières et de déchets, incluant l'évolution des stocks de produits finis dans le temps et leur contenu en matière associé, la génération de déchets différée selon des durées de vie des produits, la répartition entre différents modes de traitement des déchets (mise en décharge, incinération, recyclage...) et la réincorporation des matières recyclées dans les chaînes d'approvisionnement.

De manière similaire à l'extension à un cadre CGE, cette extension nécessitera l'introduction de nouveaux concepts dans le modèle, la mise en œuvre de méthodes de calcul intertemporelles et l'ajout de modules de résolution spécifiques pour gérer les temporalités croisées entre production, consommation et fin de vie.

2.2.5. Cibles utilisateurs et perspectives d'usage

Le modèle MatMat est conçu comme un outil d'analyse stratégique au service de la transition écologique. Sa diffusion et son appropriation progressive constituent un objectif central du projet. Il s'agira donc de garantir une utilisation effective du modèle par différents publics cibles, tout en assurant un soutien technique avancé aux équipes internes de l'ADEME.

Trois grandes catégories d'utilisateurs sont identifiées :

- **Les utilisateurs internes à l'ADEME**, notamment au sein de la **Direction Économie et Prospective (DEPR)** et de la **Direction Économie Circulaire (DEC)**, directement impliquées dans les travaux de prospective nationale.
- **Les partenaires institutionnels**, engagés dans la production de scénarios ou l'analyse de politiques publiques, tels que le **CGDD**, le **CIREN**, la **DGEC**, l'**INSEE**, et la **SMASH**.
- **La communauté scientifique et les utilisateurs tiers**, dans le cadre d'une démarche d'ouverture rendue possible par la mise en open source du modèle sur une plateforme collaborative (GitHub).

Afin de soutenir ces usages tout en limitant la sollicitation directe des ressources internes de l'ADEME, plusieurs leviers d'appui sont identifiés :

- **Documentation et guides d'usage** : la documentation technique et utilisateur du modèle devra être maintenue, enrichie et rendue facilement accessible via le dépôt public. Elle inclura des cas d'usage concrets, des tutoriels reproductibles et, si possible, des supports interactifs.
- **Formation** : des actions de formation ciblées (en présentiel ou en distanciel) pourront être organisées à destination des utilisateurs internes et des partenaires clés, afin de faciliter l'appropriation des concepts, des méthodes et des outils proposés par le modèle.
- **Support utilisateurs** : un appui ponctuel devra être apporté aux équipes de l'ADEME et à leurs partenaires directs pour faciliter la prise en main du modèle, diagnostiquer les problèmes rencontrés ou accompagner la construction de cas d'usage spécifiques.
- **Animation de la communauté** : le prestataire pourra contribuer à l'animation de la plateforme GitHub, en répondant aux sollicitations (issues), en facilitant les contributions externes (pull requests) et en assurant une modération régulière.

Le prestataire devra proposer des modalités concrètes et soutenables pour assurer ce soutien aux utilisateurs pendant toute la durée de la prestation, sans générer de charge excessive pour les équipes de l'ADEME. Il pourra notamment détailler les formats de support envisageables, les approches pédagogiques de formation proposées, et les bonnes pratiques de gestion et d'animation d'une communauté open source.

2.3. Détail de la prestation attendue

La présente prestation vise à consolider, enrichir et diffuser le modèle MatMat sur une durée d'exécution de 31 mois, incluant 28 mois de réalisation effective suivis 3 mois de validation des livrables en fin de marché. Elle s'organise selon un phasage structuré en quatre grandes étapes :

1. **Consolidation de l'existant et soutien à la mise en open source** : Phase prioritaire concentrée sur les 4 premiers mois, elle vise à stabiliser la version refondue du modèle, en consolidant les fonctionnalités déjà partiellement ou totalement implémentées, en vue de sa publication sous licence libre.
2. **Développements prioritaires et accompagnement pour la Prospective 2027** : Cette phase couvrira la mise en œuvre des fonctionnalités supplémentaires nécessaires à l'exercice de prospective piloté par l'ADEME, ainsi qu'un accompagnement technique étroit de l'équipe projet (deux personnes mobilisées au sein de la DEPR dont le chef de projet ADEME) pour l'application du modèle aux scénarios envisagés.
3. **Appui aux utilisateurs et préparation des évolutions futures** : Cette phase couvrira l'appui aux utilisateurs internes et partenaires, l'animation de la plateforme collaborative GitHub, la structuration progressive d'une communauté contributive, ainsi que la préparation des développements futurs à

travers l'analyse structurée des besoins émergents. Elle visera à renforcer l'ouverture et l'accessibilité du modèle MatMat, tout en assurant un appui technique.

4. **Développement de nouvelles fonctionnalités stratégiques** : Déployée de manière progressive, cette dernière phase vise à enrichir les capacités analytiques et conceptuelles du modèle. Le phasage détaillé des travaux sera ajusté en lien avec le chef de projet ADEME, en fonction de l'évolution des usages et des priorités identifiées.

Les actions attendues pour chacune de ces phases sont décrites ci-après, ainsi que les compétences attendues pour réaliser cette prestation. Elles devront être conduites de manière cohérente avec les objectifs, les priorités et les principes exposés en section 2.2.

Le marché n'a pas été alloti, car sa décomposition en lots distincts serait de nature à rendre techniquement difficile et économiquement moins efficace l'exécution de la prestation attendue. Les trois dimensions couvertes par le marché sont étroitement imbriquées, tant du point de vue technique que méthodologique. La séparation de ces dimensions entre plusieurs titulaires compromettrait la cohérence d'ensemble, la qualité de l'accompagnement technique et la continuité des développements. Par conséquent, il a été jugé plus pertinent de confier l'ensemble de la prestation à un prestataire unique (ou un groupement de prestataires coordonné), disposant de l'ensemble des compétences nécessaires : développement logiciel structuré, accompagnement utilisateur, compréhension des enjeux d'analyse environnementale et économique.

2.3.1. Consolidation de l'existant et soutien à la mise en open source

Objectif : Finaliser la version refondue du modèle MatMat en consolidant les fonctionnalités déjà développées, en vue d'assurer une utilisation stable, reproductible, documentée et extensible. Cette phase contribue également à la mise en ligne d'une version open source v1.0.0.

Période envisagée : T0 à T3 mois (4 mois)

Tâches principales :

1. Prise en main technique et maintenance corrective.
 - a. Installation locale du modèle et audit rapide de l'architecture existante.
 - b. Correction des éventuels bugs bloquants identifiés au démarrage de la prestation.
2. Consolidation des adaptateurs existants :
 - a. Stabilisation de l'adaptateur EXIOBASE, en renforçant sa robustesse, sa testabilité et sa documentation.
 - b. Restructuration, documentation et tests des adaptateurs de shocks existants (ThreeME, WEO, bilans énergie/GES et entrées manuelles automatisée).
 - c. Fiabilisation du couplage amont-aval avec le modèle ThreeME, en structurant les interfaces d'échange de données dans les deux sens.
3. Refonte du package de gestion des niveaux de détail sectoriel et régional
4. Consolidation des classes d'analyse : stabilisation des analyses déjà disponibles dans la version refondue (empreintes environnementales de la demande finale, prise en compte du capital).
5. Renforcement de la documentation et des tests
 - a. Garantie d'une couverture de tests automatisés supérieure ou égale à 80 % sur l'ensemble du code source du modèle.
 - b. Complétion de la documentation technique au format docstring (norme NumPy/SciPy).
 - c. Actualisation et enrichissement des tutoriels existants au format Markdown, illustrant les principaux cas d'usage fonctionnels du modèle (Transition(s) 2050 et SNBC-3).
6. Soutien à la publication de la version v1.0.0 en open source
 - a. Finalisation du dépôt public GitHub.
 - b. Mise en ligne sur Zenodo sous DOI et licence CeCILL.

Livrables attendues :

- Version v1.0.0 stabilisée, testée et documentée du modèle MatMat, publiée sur le dépôt GitHub public et accompagnée de tutoriels reproductibles, constituant un socle robuste pour les usages internes, la diffusion externe et les développements ultérieurs du marché.
- Version révisée de l'article scientifique et de son annexe technique existants, avec participation au processus de publication.
- Rapport d'exécution de la phase 1, présentant les travaux réalisés, les livrables produits, les difficultés rencontrées et les perspectives pour les phases suivantes.

2.3.2. Développements prioritaires et accompagnement pour la Prospective 2027

Objectif : Intégrer les fonctionnalités encore non portées dans la version refondue (notamment sous forme de scripts monolithiques ou externes), renforcer les capacités analytiques du modèle MatMat pour répondre aux besoins spécifiques de la Prospective ADEME 2027, et accompagner étroitement les modélisateurs dans l'application du modèle aux scénarios de transition.

Période envisagée : T4 à T9 mois (6 mois)

Tâches principales :

1. Développement des adaptateurs manquants :
 - a. Développement et intégration des adaptateurs d'accounts nécessaires à la mise en cohérence et à l'hybridation des données d'EXIOBASE avec les données nationales, aujourd'hui disponibles sous forme de scripts externes.
 - b. Automatisation des traitements issus d'expertises sectorielles (agriculture, recyclage) via des adaptateurs de shocks pleinement intégrés.
2. Amélioration des capacités d'analyse environnementale
 - a. Refonte et intégration des analyses non encore migrées dans l'architecture actuelle (diagrammes de Sankey, méthode d'extraction hypothétique - HEM).
 - b. Implémentation d'une classe d'analyse pour la Structural Decomposition Analysis (SDA) sur séries historiques, permettant de décomposer les évolutions rétrospectives des empreintes en facteurs explicatifs.
 - c. Décomposition analytique des variations prospectives entre scénarios, en lien avec les principaux leviers de transition (sobriété, efficacité, circularité, relocalisation, etc.).
 - d. Standardisation des formats de restitution, incluant des visualisations graphiques et des jeux de données structurés, facilitant l'analyse comparative et la communication des résultats.
3. Représentation des interdépendances entre composantes du modèle (système et extensions) :
 - a. Évolution éventuelle des méthodes de calcul au niveau des accounts
 - b. Application au cas d'étude de la modélisation des transports dans la prospective.
4. Soutien à la mise en œuvre opérationnelle : Appui technique aux deux modélisateurs de la DEPR (dont le chef de projet ADEME) pour la mobilisation du modèle et de ses développements dans les scénarios de la Prospective ADEME 2027.

Livrables attendues :

- Une nouvelle version du modèle MatMat incluant les développements décrits.
- Une version préliminaire des tests automatisés et de la documentation associés à ces développements.
- Rapport d'exécution de la phase 2, présentant les travaux réalisés, les livrables produits, les difficultés rencontrées et les perspectives pour les phases suivantes.

2.3.3. Appui aux utilisateurs et préparation des évolutions futures

Objectif : Fournir un soutien technique aux utilisateurs internes et partenaires institutionnels, structurer et animer la communauté autour du dépôt open source du modèle MatMat, assurer la publication progressive de versions stables, et préparer l'extension du modèle par une formalisation rigoureuse des besoins et des pistes de développement stratégiques.

Période envisagée : T10 à T17 mois (8 mois)

Tâches principales :

- Consolidation de la documentation et ressources pédagogiques :
 - Intégration d'une documentation interactive (type ReadTheDocs).
 - Rédaction et enrichissement des guides utilisateurs et contributeurs.
 - Développement de tutoriels reproductibles et exemples thématiques.
- Renforcement de la robustesse logicielle
 - Amélioration continue de la couverture de tests automatisés sur le code source.
 - Suivi des bonnes pratiques de développement open source sur GitHub.
- Formation des utilisateurs :

- Conception des supports de formation (présentations, notebooks, exercices).
 - Animation de deux sessions de formation à destination des équipes internes de l'ADEME et de leurs partenaires.
- Support utilisateurs et maintenance :
 - Assistance technique ponctuelle aux utilisateurs internes et partenaires.
 - Suivi et réponse aux tickets GitHub (issues, pull requests).
 - Appui à la mise en œuvre de cas d'usage spécifiques.
- Publication incrémentale du modèle : Mise en ligne progressive de nouvelles versions stables du modèle sur GitHub, accompagnées de leur dépôt Zenodo avec DOI, sous licence CeCILL.
- Méthodologie de développement fonctionnel : Proposition d'une méthodologie standardisée applicable à tout développement futur, incluant :
 - Analyse des besoins métiers.
 - Formalisation en spécifications fonctionnelles.
 - Implémentation dans l'architecture logicielle.
 - Documentation et tests.
- Préparation des développements stratégiques : Application de la méthodologie ci-dessus à deux priorités identifiées :
 - Extension vers une approche en équilibre général calculable simplifiée.
 - Intégration d'une modélisation dynamique des flux de matières et de déchets.

Livrables attendues :

- Versions incrémentales du modèle MatMat publiées sur GitHub et Zenodo (DOI, licence CeCILL).
- Documentation interactive accessible en ligne (type ReadTheDocs), accompagnée de guides utilisateurs et contributeurs (formats Markdown/PDF).
- Tutoriels reproductibles (notebooks, cas d'usage thématiques).
- Supports de formation (présentations, exercices, tutoriels).
- Rapport synthétique d'exécution des formations décrivant les objectifs de chaque session, le public formé, les contenus abordés, les modalités d'animation, les retours éventuels des participants, et les perspectives d'amélioration.
- Rapport présentant la méthodologie standardisée pour le développement de nouvelles fonctionnalités et son application aux développements identifiés.

2.3.4. Développement de nouvelles fonctionnalités stratégiques

Objectif : Étendre les capacités analytiques, méthodologiques et conceptuelles du modèle MatMat afin de renforcer sa portée pour l'évaluation des scénarios de transition écologique à l'échelle nationale. Cette phase visera à implémenter les développements stratégiques identifiés en section 2.2.4 et non intégrés précédemment, à approfondir les travaux de documentation, de tests et de mise en open source, et à structurer durablement la logique modulaire et ouverte du modèle.

Période envisagée : T18 à T27 mois (10 mois)

Tâches principales :

- Développement des fonctionnalités stratégiques
 - Représentation des interdépendances entre composantes
 - Extension vers une approche CGE simplifiée
 - Modélisation dynamique des flux de matières et de déchets
- Structuration et standardisation du processus de développement

- Application systématique de la méthodologie rigoureuse mise en place en phase 3 : spécification, implémentation, tests, documentation.
 - Organisation du code pour accueillir facilement de futurs modules ou extensions.
- Documentation et mise en open source
 - Mise à jour régulière de la documentation technique, des tutoriels et des guides de contribution.
 - Publication incrémentale sur GitHub et Zenodo de nouvelles versions stables intégrant les fonctionnalités développées dans cette phase si pertinent (à valider avec le chef de projet).
- Tests, validation et maintenance
 - Couverture de tests systématique pour tous les nouveaux modules.
 - Déploiement de tests d'intégration et fonctionnels élargis pour assurer la robustesse et la cohérence globale du modèle.

Livrables attendues :

- Nouvelles versions stables du modèle MatMat potentiellement publiées en open source.
- Documentation technique, guides utilisateurs et contributeurs mis à jour.
- Tutoriels thématiques illustrant les nouvelles fonctionnalités développées.
- Rapport(s) de développement décrivant l'architecture logicielle les arbitrages de développements.

2.4. Prestation supplémentaire éventuelle et tranches optionnelles

Cette section présente les prestations supplémentaires éventuelles et les tranches optionnelles susceptibles de compléter le périmètre des tranches fermes précédemment introduites. Ces éléments ne sont pas automatiquement inclus dans le marché initial :

- Les prestations supplémentaires éventuelles peuvent être proposées par les candidates dans leur offre initiale, si elles disposent de solutions innovantes jugées pertinentes pour répondre aux enjeux de la mission.
- Les tranches optionnelles, quant à elles, pourront être affirmées par l'ADEME en fonction des besoins constatés, des usages réels du modèle et de l'évolution de la trajectoire du projet.

2.4.1. Prestation supplémentaire éventuelle : Automatisation du processus de développement

Objectif : Structurer et automatiser partiellement la chaîne de traduction entre les besoins métiers, les spécifications fonctionnelles et le développement logiciel, afin de fiabiliser et accélérer les évolutions du modèle MatMat.

Période envisagée : T10 à T27 mois (18 mois).

Contenu attendu :

- Intégration d'outils d'intelligence artificielle (IA) ou de frameworks avancés d'ingénierie logicielle facilitant formalisation des besoins métiers, leur traduction en spécifications et la génération assistée de code.
- Déploiement d'un agent IA ou d'un outil interactif pour assister les contributeurs dans la formalisation des besoins, la génération de documentation technique, de tests et de code.
- Application concrète de la solution proposée en priorité aux développements des phases 3 et 4, ainsi qu'à ceux prévus dans la tranche optionnelle n°3 (si activée).

Livrables attendus :

- Un démonstrateur opérationnel appliqué à plusieurs cas réels de développement du modèle MatMat.
- Rapport d'exécution de la prestation supplémentaire éventuelle, présentant les travaux réalisés, les livrables produits, les difficultés rencontrées et les perspectives d'amélioration.

Condition de réalisation : Cette prestation pourra être proposée librement par les candidates dans leur offre initiale, si une solution pertinente est identifiée et documentée.

2.4.2. Tranche optionnelle n°1 : Une session de formation supplémentaire

Objectif : Renforcer la montée en compétence des utilisateurs internes et des partenaires institutionnels sur l'usage du modèle MatMat.

Période envisagée : T18 à T27 mois (10 mois)

Contenu attendu : Organisation d'une session de formation supplémentaire (contenu à définir en lien avec l'ADEME), en complément des deux autres sessions déjà prévues dans la phase 3.

Livrables attendus :

- Supports de formation complémentaires (présentations, exercices, tutoriels).
- Rapport synthétique d'exécution décrivant les objectifs de la session, le public formé, les contenus abordés, les modalités d'animation, les retours éventuels des participants, et les perspectives d'amélioration.

Condition de déclenchement : Cette tranche optionnelle pourra être affermie par l'ADEME au plus tard fin avril 2027, en fonction des besoins exprimés à l'issue de la phase 3 et du niveau d'appropriation et de diffusion du modèle.

2.4.3. Tranche optionnelle n°2 : Animation de la communauté open source

Objectif : Structurer et animer plus activement la communauté d'utilisateurs et de contributeurs autour du dépôt GitHub du modèle MatMat, en cas de montée en charge de l'activité.

Période envisagée : T18 à T27 mois (10 mois)

Contenu attendu :

- Mise en place d'outils collaboratifs avancés (forums, wiki, newsletters).
- Animation de webinaires communautaires, réponses aux contributions externes, revue de code collaborative.
- Structuration progressive des rôles de contributeurs, relecteurs, mainteneurs au sein de la communauté open source.

Condition de déclenchement : Cette tranche optionnelle pourra être affermie par l'ADEME au plus tard fin avril 2027, si l'intensité de l'activité sur GitHub, l'augmentation du nombre de contributions, d'usages ou de sollicitations externes le justifie.

2.4.4. Tranche optionnelle n°3 – Développement de nouvelles fonctionnalités non identifiées à ce jour

Objectif : Intégration de nouvelles évolutions fonctionnelles du modèle MatMat qui émergeraient en cours de mission, en lien avec les usages ou les priorités évolutives de l'ADEME et de ses partenaires.

Période envisagée : T18 à T27 mois (10 mois)

Contenu attendu :

- Analyse des besoins métiers et formalisation de nouvelles spécifications fonctionnelles.
- Implémentation, documentation et tests des nouvelles fonctionnalités validées.
- Application éventuelle des outils IA issus de la prestation supplémentaire, si celle-ci est réalisée.

Condition de déclenchement : Cette tranche optionnelle pourra être affermie par l'ADEME au plus tard fin avril 2027, en fonction des besoins exprimés par l'ADEME ou ses partenaires, et après arbitrage des priorités par le chef de projet ADEME.

2.5. Critères d'exécution et spécifications techniques

2.5.1. Compétences et expériences attendues du prestataire

Développement logiciel (obligatoire)

- Programmation Python :
 - Maîtrise avancée du langage Python, appliqué à des projets scientifiques et analytiques.
 - Pratique de l'écosystème scientifique Python (pandas, numpy, etc.).
- Architecture logicielle :
 - Solide expérience en programmation orientée objet, avec implémentation de structures modulaires, évolutives et testables.
 - Capacité à structurer des projets maintenables selon les bonnes pratiques de développement logiciel.
- Tests et documentation :
 - Mise en place d'environnements de tests automatisés (tests unitaires et d'intégration) et de pipelines d'intégration continue.
 - Suivi de la couverture de tests, documentation via docstrings et génération automatique.
- Pratique avérée de la gestion de versions avec Git et GitHub (ou équivalent), incluant :
 - Utilisation des branches, gestion des pull requests, releases, issues, etc.
 - Structuration et maintenance de dépôts open source publics, y compris gestion de la documentation et des contributions externes.
- Pédagogie en vue du soutien utilisateur

Compétences métiers (appréciées)

- Connaissances en écologie industrielle et/ou économie de l'environnement.
- Intérêt pour les enjeux de transition écologique.
- Notions ou expériences en analyse Entrées-Sorties et/ou modélisation macroéconomique.

2.5.2. Démarches environnementales

Dans une logique d'écoresponsabilité, les soumissionnaires devront intégrer, dans la mise en œuvre de la prestation, des démarches visant à limiter l'empreinte environnementale de leurs activités. Les mesures attendues relèvent de bonnes pratiques applicables tout au long de l'exécution du marché.

Sans être exhaustives ni obligatoires, les actions suivantes sont encouragées :

- **Pratiques de développement logiciel écoresponsable :**
 - Optimisation de l'efficacité énergétique du code (réduction de la complexité algorithmique, minimisation des charges serveur ou locales).
 - Adoption et documentation de pratiques de sobriété numérique.
- **Organisation du travail et logistique :**
 - Limitation des déplacements physiques (recours aux outils de visioconférence, télétravail).
 - Compensation des émissions liées aux déplacements lorsque ceux-ci sont nécessaires.
- **Choix des outils et infrastructures :**
 - Recours à des services d'hébergement ou d'exécution à faible impact environnemental.
 - Réutilisation de composants logiciels existants et limitation des dépendances superflues.
- **Production documentaire :**
 - Dématérialisation systématique des livrables.
 - Formats ouverts et interopérables favorisant la réutilisation.
- **Implication des parties prenantes :**
 - Intégration de l'écoconception dans les démarches de formation, d'animation de communauté et de documentation.

3. Organisation et pilotage de la prestation

3.1. Encadrement et suivi de la prestation

Le chef de projet, Antoine Teixeira (DEPR/SEF), assurera un accompagnement étroit du prestataire, notamment lors de la phase initiale de prise en main du modèle MatMat et tout au long de la restitution des développements. En complément du rôle de pilotage et de validation des livrables, il contribuera activement aux développements, garantissant ainsi une synergie optimale entre les expertises métiers (portées par l'ADEME) et les compétences techniques du prestataire.

Le succès de la prestation reposera en grande partie sur cette collaboration étroite. À ce titre, le prestataire est invité à proposer, dans son offre, une stratégie de mobilisation des expertises internes de l'ADEME, en identifiant les tâches où la participation conjointe est pertinente, les modalités de collaboration, ainsi qu'un volume indicatif minimal d'échanges souhaitables.

Le prestataire devra organiser au moins trois réunions de pilotage en présentiel ou à distance :

- Une réunion de lancement, organisée après la prise en main du modèle (au plus tard T4 mois).
- Une réunion intermédiaire à mi-parcours, permettant un point d'étape approfondi.
- Une réunion de restitution finale, présentant les livrables et les perspectives.

Ces réunions impliqueront le comité de pilotage composé de membres de la DEPR et de la DEC, ainsi que des partenaires institutionnels mobilisant le modèle MatMat (CIRED, DGEC, etc.).

Par ailleurs, des réunions de suivi opérationnel, en visio ou en présentiel, seront programmées au minimum tous les 15 jours entre le prestataire et le chef de projet ADEME.

Enfin, le marché étant à prix forfaitaire, toute évolution du périmètre des prestations devra faire l'objet d'une validation préalable de l'ADEME. Le prestataire s'engage à ne pas engager de tâches non prévues au présent cahier des charges sans accord écrit de l'ADEME.

3.2. Calendrier de réalisation des prestations

Le candidat devra proposer, dans son offre, un calendrier prévisionnel détaillé, précisant :

- La répartition des différentes phases du projet.
- Les échéances de remise des livrables.
- Les dates prévisionnelles des réunions.
- Les éventuels jalons intermédiaires.

La durée maximale de la prestation est fixée à 31 mois à compter de la notification du marché, incluant les phases de validation des livrables finaux de 3 mois.

Le lancement de la prestation est envisagé entre fin octobre et mi-novembre 2025.

À titre indicatif, la Figure 3 propose un le diagramme de Gantt synthétisant le phasage prévisionnel envisagé pour la mise en œuvre des différentes étapes du projet. Il servira de base au cadrage du calendrier proposé par les candidats dans leur offre.

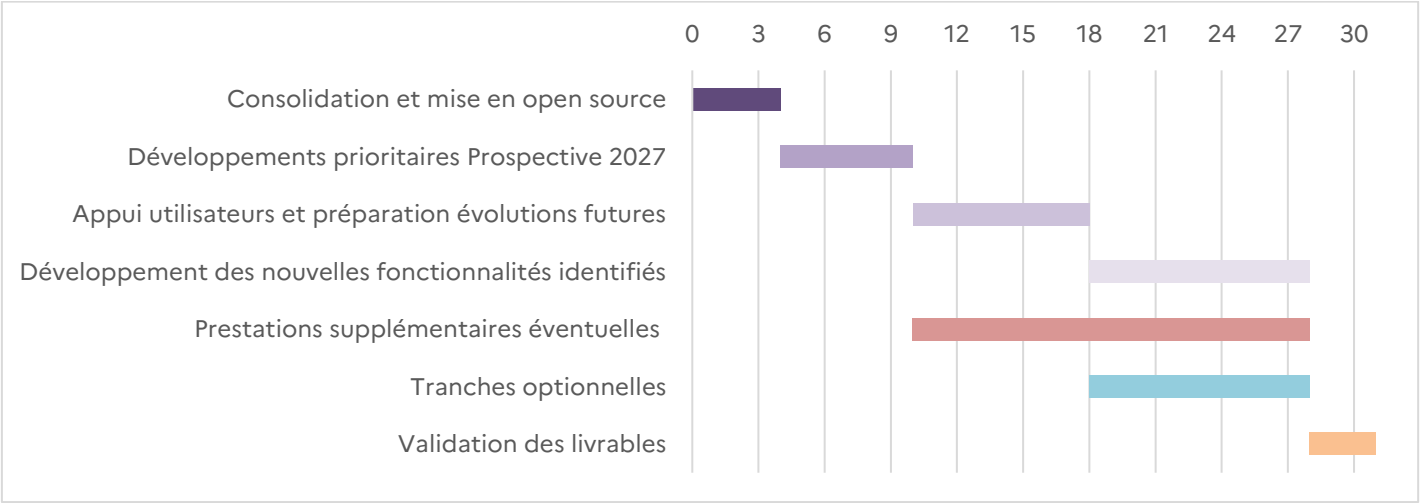


Figure 3 : Diagramme de Gantt indicatif des phases du projet.

4. Références

1. Teixeira, A. MatMat - Hybrid Input-Output framework to estimate country-level carbon and material footprints in future scenarios. Preprint at <https://hal.science/hal-04672116> (2024).
2. Teixeira, A., Lefèvre, J., Saussay, A. & Vicard, F. *Construction de matrices de flux de matières pour une prospective intégrée énergie-matières-économie: Revue de littérature et cadrage méthodologique pour le développement du modèle MatMat*. <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/3880-construction-de-matrices-de-flux-de-matieres-pour-une-prospective-integree-energie-matieres-economie.html> (2020).
3. Teixeira, A., Grand, J., Vicard, F., Lefevre, J. & Fontaine, B. MatMat v1.0.0—A modular Input-Output framework: Assessing country-driven environmental and socio-economic impacts of forward-looking scenarios along global supply chains. in *19th Society and Materials (SAM) International Conference* (2025).
4. Teixeira, A., Lefevre, J. & Gherzi, F. Upscaling materials recycling to enhance sustainability and economic resilience. in *14ème Journées Thématiques FAERE* (2024).
5. Teixeira, A. & Lefèvre, J. Global supply chains and domestic climate policy: Addressing the substantial material-related carbon footprint of final consumption in France. *Journal of Industrial Ecology* (2025) doi:10.1111/jiec.70001.
6. Teixeira, A. & Vicard, F. Comparing the sustainability of energy sufficiency & technological change in NZE strategies in France. in *19th Society and Materials (SAM) International Conference* (2025).
7. Vicard, F. & Teixeira, A. *Feuilleton Évaluation Des Empreintes Carbone et Matières Des Scénarios Transition(s) 2050*. <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/6250-prospective-transitions-2050-feuilleton-empreintes.html> (2024).