

Game Changers de la Transition

Ateliers ESPCI Paris – PSL & Chimie ParisTech – PSL
Synthèse des ateliers

7-8 janvier 2026



Cadre et objectifs de l'initiative

Contexte général

Zenon Research a organisé, pour l'ESPCI Paris – PSL et Chimie ParisTech – PSL, des ateliers de prospective intitulés "Les Game Changers de la Transition" les 7 et 8 janvier 2026. Ces ateliers visaient à mobiliser les élèves-ingénieurs sur les enjeux de décarbonation et d'innovation climatique à travers un exercice collectif de réflexion prospective.

Objectifs

Permettre aux étudiants, répartis en groupes d'une dizaine de participants, de :

- Discuter et débattre sur des situations de rupture liées aux innovations, technologies, accidents, politiques publiques et réglementations
- Confronter leurs points de vue sur les conséquences de ces ruptures pour la transition écologique
- Développer une vision systémique des enjeux de décarbonation
- Identifier les leviers d'action, les freins et les impacts potentiels de différentes stratégies
- Coopérer au sein de groupes mixtes réunissant étudiants de l'ESPCI et de Chimie ParisTech, favorisant ainsi les échanges inter-écoles et l'enrichissement mutuel par la diversité des parcours et des sensibilités
- Développer des compétences collaboratives essentielles pour les futurs ingénieurs : écoute, argumentation, construction collective, gestion du temps en équipe

10 thématiques déterminées par un processus collaboratif

Plusieurs semaines avant l'exercice, un questionnaire a été diffusé auprès des étudiants des deux écoles pour déterminer les thématiques des ateliers Game Changers. 107 étudiants ont répondu et formulé 88 propositions.

L'équipe de Zenon Research a analysé l'ensemble de ces propositions et arrêté une liste finale suivante de 10 thématiques, organisées en 4 blocs :

Bloc 1 : Ressources & circularité

1. Économie circulaire radicale & recyclage avancé
2. Matières critiques
3. Capture et stockage du CO₂ : mirage ou levier ?

Bloc 2 : Énergie & industrie

- 4. Les nouvelles frontières du nucléaire
- 5. Décarbonation de l'industrie chimique
- 6. Réindustrialisation verte et souveraineté industrielle

Bloc 3 : Numérique & climat

- 7. Sobriété numérique & impacts du digital
- 8. Événements climatiques extrêmes

Bloc 4 : Systèmes & mobilités

- 9. Crise de l'eau & services écosystémiques
- 10. Mobilités bas-carbone : arbitrages par secteur

Cf. en Annexe ci-dessous les restitutions des 21 Groupes

Au-delà de ces thématiques et des Game Changers identifiés, les réflexions des étudiants ont fait émerger plusieurs enjeux transversaux :

Acceptabilité sociale : frein majeur systématique

- Mentionnée dans presque tous les sujets (nucléaire, méga bassines, data centers, industries chimiques, réindustrialisation, urbanisation)

Souveraineté et dépendances stratégiques

- Préoccupation forte concernant les dépendances aux matières critiques, à l'énergie fossile importée, aux technologies numériques
- Tension : comment concilier souveraineté européenne et coopération internationale nécessaire ?
- Conscience aiguë de la dépendance géopolitique (Chine, États-Unis)

Inégalités et justice dans la transition

- Conscience du risque de fracture sociale dans l'accès aux technologies vertes
- Préoccupation sur la répartition des efforts de transition

Tensions temporelles court terme / long terme

- Investissements initiaux vs bénéfices différés

Prédominance du techno-solutionnisme

- Une majorité écrasante des solutions proposées sont technologiques
- La sobriété est rarement centrale, souvent mentionnée comme "complément" obligé

Adaptation vs atténuation

- Prédominance très nette de l'atténuation (réduction des émissions)

Conclusion et perspectives

Les ateliers Game Changers ont mobilisé plus de 200 étudiants de l'ESPCI et de Chimie ParisTech autour des enjeux de transition écologique. En 1h30 par groupe, les participants ont produit 21 analyses prospectives qui, dans leur diversité, offrent un panorama riche des préoccupations et des réflexions de cette génération de futurs ingénieurs.

Ce que l'exercice a permis :

- de créer des ponts entre l'ESPCI et Chimie ParisTech : la composition mixte des groupes a favorisé les rencontres, les échanges et la construction d'un réseau inter-écoles qui perdurera au-delà de l'exercice
- de développer l'intelligence collective : confronter les points de vue, construire ensemble une analyse, arbitrer collectivement sont des compétences décisives pour les futurs ingénieurs amenés à travailler en équipes pluridisciplinaires
- de confronter les étudiants à la complexité des arbitrages dans la transition
- d'identifier des thématiques qui préoccupent cette génération (souveraineté, acceptabilité sociale, justice)
- d'encourager une réflexion systémique.

Perspectives

Ces ateliers constituent une première étape prometteuse dans la sensibilisation des futurs ingénieurs aux enjeux de décarbonation. Ils révèlent un intérêt réel pour ces questions et dessinent des pistes d'approfondissement pour renforcer les méthodologies d'analyse prospective.

L'engagement des étudiants, la richesse de certaines analyses et la diversité des approches montrent que ce format pédagogique répond à un besoin. Au-delà des contenus produits, la dynamique collaborative inter-écoles créée par ces ateliers représente une valeur ajoutée majeure : elle préfigure les modes de travail que ces futurs ingénieurs devront maîtriser dans leurs carrières, où la coopération entre organisations, disciplines et cultures sera déterminante pour relever les défis de la transition.

Pour des ingénieurs amenés à concevoir les procédés industriels de demain, la maîtrise de ces compétences d'analyse systémique, de prospective et de prise en compte des multiples dimensions (techniques, économiques, sociales, géopolitiques) de la transition est essentielle. Ces ateliers constituent un outil pédagogique précieux pour développer ces compétences tout en renforçant la capacité à travailler collectivement sur des enjeux complexes.

L'exercice gagnerait à être reproduit dans d'autres établissements d'enseignement supérieur. L'équipe de Zenon envisage également de le proposer à des entreprises partenaires.

Annexe : restitutions des 21 groupes

Groupe 1 : Gestion de la ressource en eau dans l'agriculture

Diagnostic :

- 2,2 milliards de personnes sans accès à des réseaux d'eau potable dans le monde
- Déséquilibre offre/demande accentué par la consommation agricole et les nouveaux usages (IA, data centers)
- Perturbation du cycle de l'eau douce, acidification, pollution
- Gaspillage et fuites, inondations et sécheresses

Focus France – irrigation agricole :

- Inégalités d'accès aux ressources selon le type d'agriculture et les agriculteurs
- Pression sur les nappes phréatiques
- Dépendance à la finalité des cultures (alimentation, carburant, élevage)
- Dépendance saisonnière et géographique
- Impact des événements climatiques extrêmes

Leviers proposés :

- Agroforesterie et changement du modèle agricole
- Méga Bassines (solution controversée)
- Législation et subventions
- Outils de sensibilisation
- Réseaux d'évacuation des eaux usées
- Limitation des exportations agricoles

Impacts identifiés :

- Création d'inégalités potentielles
- Nécessité de changement de consommation et de pratiques (consommation plus locale)
- Coût et travail supplémentaire pour les agriculteurs

Freins :

- Acceptabilité sociale des solutions proposées
- Rentabilité des nouveaux modèles agricoles
- Risques : réduction de surface agricole, vidage des nappes, baisse du débit des rivières, destruction d'écosystèmes

Force du signal : Modéré / Majeur

Horizon temporel : Court terme (2030)

Groupe 2 : Crise de l'eau – état d'urgence

Constat :

- "Dans 20 ou 30 ans il n'y en aura plus"
- L'eau potable est une ressource précieuse
- Accessibilité limitée, conflits sur l'utilisation, contamination, assèchement des cours d'eau

État d'urgence anticipé :

- Réaction forcée des industriels
- Création de procédés de désalinisation ou autres moyens de récupération d'eau potable
- Pollution industrielle devenant trop coûteuse (obligation de réutilisation)
- Limitation de la consommation devenant "obligatoire"
- Intensification des conflits sur l'utilisation de l'eau
- Manque d'énergie pour les traitements

Constats critiques :

- Les consommateurs ne connaissent pas les quantités d'eau utilisées
- Le remplacement/traitement de l'eau coûte cher

Impacts :

- Baisse de biodiversité
- Changement des modes de vie
- Migrations forcées
- Inflation

Force du signal : Critique / Omniprésent



Groupe 3 : Décarbonation du secteur aérien

Constats :

- 2,5% des émissions de GES, mais impact climatique total évalué à 5% (incluant traînées de condensation et effets à haute altitude)
- Secteur difficile à substituer pour les longues distances

Deux "Game Changers" identifiés :

1. Réduction de l'usage :
 - Développement du tourisme local
 - Législation sur l'économie carbone (taxes, quotas)
2. Nouvelles technologies :
 - SAF (Sustainable Aviation Fuel)
 - Moteurs plus efficaces et avions plus légers
 - Gestion optimisée des trajets, routes et trafic

Analyse des impacts :

- Économiques : négatif à court terme (diminution de l'industrie aéronautique, baisse du tourisme international), incertain sur le long terme
- Sociaux : restrictions de liberté de déplacement, risque de fracture sociale (seules les minorités aisées maintiendraient leurs déplacements), secteur difficile à substituer
- Environnementaux : positifs avec la réduction d'usage, incertains pour les nouvelles technologies (SAF pouvant entraîner privatisation des terres agricoles)

Freins : Importants – dépendent des politiques, réglementations et développements technologiques

Force du signal : Significatif

Horizon : 2070



Groupe 4 : Déconstruction du mythe de la France pavillonnaire

Diagnostic :

- Étalement périurbain et multiplication des cités-dortoirs
- Faiblesse des transports en commun dans ces zones
- Utilisation intense de la voiture avec émissions de CO₂ et pollutions importantes
- Secteur tertiaire (majorité des emplois) concentré dans les centres urbains

Description du Game Changer : Politique publique incitative visant à :

- Densifier les zones urbaines existantes
- Décourager l'étalement urbain et la construction de pavillons
- Soutenir la création d'éco-quartiers urbains
- Encourager les logements collectifs de qualité
- Transformer les bureaux inoccupés en logements
- Supprimer les politiques d'incitation à l'achat de pavillons

Opportunités :

- Construction de bâtiments urbains de qualité
- Gains de qualité de vie (logement mieux salubre, proximité des services)
- Réduction drastique de l'usage de la voiture pour les trajets domicile-travail
- Cohésion sociale accrue

Risques :

- Mouvements sociaux importants
- Saturation des transports en commun
- Adaptation des infrastructures et des services
- Augmentation du coût de la vie

Impacts :

- Réduction des coûts de logement (à terme)
- Réduction des mobilités individuelles
- Moins de véhicules en ville
- Réduction significative des émissions et pollutions liées aux trajets domicile-travail

Verrous majeurs :

- Mentalités (attachement culturel à la maison individuelle)
- État des finances publiques
- Acceptabilité sociale

Force du signal : Important

Horizon temporel : Long terme

Force de l'impact : Majeur

Groupe 5 : Recyclage des batteries

Enjeux stratégiques :

- 90% de la demande de batteries pour véhicules électriques → multiplication par 12 de la demande totale de batteries
- 2 à 4 millions de batteries en fin de vie d'ici 2035
- Recyclage actuellement faible
- Forte augmentation prévue : 10-16% des métaux issus du recyclage en 2030, 20-30% à long terme
- Objectif UE : 70% de recyclage des batteries de véhicules électriques d'ici 2030

Leviers proposés – triptyque réglementaire et économique :

1. Éco-conception :
 - Subvention de la recherche pour concevoir des batteries plus recyclables
 - Réglementation conséquente pour imposer l'éco-conception aux industriels
2. Réglementation de la production :
 - Pourcentage minimal de métaux issus du recyclage dans les nouvelles batteries
 - Augmentations progressives de ce pourcentage
 - Interdiction de l'enfouissement/mise en décharge des batteries usagées
3. Soutien industriel :
 - Subventions à l'industrie du recyclage
 - Subventions aux fabricants de batteries recyclées

Bénéfices attendus :

- Réduction de l'empreinte carbone
- Limitation de l'extraction des ressources naturelles
- Moindre dépendance vis-à-vis des pays fournisseurs de ressources minières (autonomie stratégique)
- Position de leader dans le recyclage : les autres pays pourraient envoyer leurs batteries pour traitement et réintroduction dans la chaîne de valeur
- Nouvelles entreprises ou développement des entreprises existantes
- Création d'emplois
- Réduction du coût de production des voitures électriques (à très long terme)

Défis identifiés :

- **Économiques** : coût élevé de mise en place des systèmes de recyclage, nécessité de changer toute la ligne de production, projets d'éco-conception et d'industrialisation à grande échelle
- **Industriels** : risque de protestation des entreprises face aux nouvelles contraintes

- **Environnementaux** : risque de créer de nouvelles formes de pollution (utilisation de solvants difficiles voire impossibles à traiter correctement)
- **Sécurité** : manipulation de substances toxiques renforçant les contraintes de sécurité, formation et protection des travailleurs
- **Compétitivité** : perte potentielle si les coûts de production augmentent (technologies, équipements, contrôles supplémentaires)

Force du signal : Significatif

Horizon temporel : 2040



Groupe 6 : Politiques publiques favorisant l'économie circulaire

Diagnostic :

- Économie linéaire dominante
- Obsolescence programmée généralisée
- Surconsommation liée aux médias et publicité
- Gaspillage important
- Manque de sensibilisation des consommateurs

Leviers proposés :

1. Orientation de la consommation vers des produits qualitatifs, réparables et recyclables
2. Aide financière de l'État pour recycler et réutiliser
3. Sensibilisation et éducation autour de l'importance de la circularisation de l'économie
4. Mise en commun de certains objets du quotidien pour limiter la production potentiellement polluante

Opportunités :

- **Consommateur** : consommer moins cher des produits meilleurs
- **Industriel** : produire plus facilement grâce à l'aide de l'État
- **Société** : création d'un lien social

Risques :

- Risque de brider l'innovation technologique
- Creuser les inégalités et limiter le pouvoir d'achat du consommateur le plus pauvre
- Difficulté pour certaines industries très linéaires

Impacts :

- **Social** : création de lien social, orientation vers une société de confiance
- **Économique** : relocalisation de l'économie en France, moins de déchets et de production au niveau mondial
- **Culturel** : prise de conscience, responsabilisation et respect du bien public

Verrous :

- Manque de civisme
- Rupture générationnelle
- Problème de responsabilité
- Manque de solution technologique dans certains domaines

Force du signal : Important

Horizon temporel : Moyen terme

Force de l'impact : Écologique et économique – Significatif / Culturel – Majeur

Groupe 7 : Énergie et dépendance aux matières critiques

Problématiques identifiées :

- Abondance/utilisation croissante
- Enjeux géopolitiques (concentration des ressources)
- Extraction difficile (espèces très diluées dans le sol)
- Aspects économiques

Définition retenue :

- Matière critique = définie par matrice de criticité (importance dans l'usage × risque d'approvisionnement)
- Matériau critique = haute importance ET risque élevé
- Liste de 34 matières premières critiques établie par l'UE (2024)
- Exemples : lithium (batteries), cobalt, nickel

Impacts environnementaux et sociaux :

- Fort impact environnemental de l'extraction et de l'utilisation
- Impact social des conflits liés à l'extraction
- Impact sur les populations locales (exploitation)
- Destruction des écosystèmes
- Risque d'effet rebond et augmentation du nombre de mines
- Limite planétaire sur le changement d'usage des sols
- Création de conflits globaux (géopolitiques, économiques)
- Inégalités d'accès aux technologies

Leviers proposés :

- Législations internationales
- Nouvelles technologies de recyclage
- Alternatives techniques indépendantes des matières critiques
- Recyclage des matériaux
- Réduction du gaspillage
- Recherche de matériaux organiques alternatifs
- Nouveaux projets de recherche

Force du signal : Très variable selon la matière considérée

Force de l'impact : Majeur

Groupe 8 : Recherche et écoconception à l'échelle européenne

Constats :

- Croissance des besoins en matières critiques
- Manque de matériaux disponibles en Europe
- Conflits et tensions géopolitiques (concentration des ressources, notamment en Chine)
- Questions éthiques liées à l'extraction
- Incompatibilité avec les enjeux environnementaux

Objectifs stratégiques :

- Réduire la dépendance aux pays tiers (notamment Chine)
- Augmenter la compétitivité européenne
- Réduire la demande en matières critiques
- Garantir l'efficacité des matières recyclées

Leviers proposés :

- Économie circulaire généralisée
- Orienter la recherche vers la recyclabilité et l'écoconception
- Sensibiliser à la sobriété
- Pousser la réglementation : pénaliser l'obsolescence programmée, renforcer l'indice de réparabilité
- Recherche et écoconception à l'échelle européenne
- Investissements massifs dans la recherche
- Faire bloc face à la Chine et aux États-Unis

Opportunités :

- Rentabilité à long terme
- Faire bloc européen face aux grandes puissances

Freins et risques majeurs :

- Temps de déploiement trop long
- Lobbying des entreprises désavantagées pour bloquer les normes
- Verrous technologiques
- Compétitivité et concurrence internationale
- Faible levier de l'Europe sur l'échiquier mondial

Force du signal : Modéré / Important

Horizon temporel : Très long terme

Évaluation : Risqué

Groupe 9 : Capture et stockage du CO₂, Vision prudente – Usage ciblé

Contexte :

- Émissions de GES trop importantes
- Deux possibilités : réduire à la source OU capturer après émission
- 11 milliards d'euros d'investissement actuels

Technologies envisagées :

- Capture artificielle :
 - Post-combustion : capture sur les fumées
 - Pré-combustion : transformation en syngas (H₂ + CO₂)
 - Oxycombustion : combustion avec oxygène pur
 - Stockage par enfouissement
- Capture naturelle :
 - Utilisation de puits de carbone biologique (océan, forêt, tourbières)

Position du groupe : "Utiliser en gardant une sobriété et une volonté de diminuer les émissions"

- Utilisation principalement pour les émissions difficile à réduire (industrie lourde)
- Avis partagé sur la méthode : risque d'effet rebond important
- "Soit on arrête d'émettre"

Impacts identifiés :

- **Économiques** : coût de la transition élevé
- **Sociaux** : création d'emplois, mais crainte des risques locaux par les populations
- **Environnementaux** : diminution de la concentration en CO₂

Risques :

- Risque d'impacter les financements pour la réduction à la source
- Risque que le CO₂ soit relâché

Limites technologiques :

- Rendement faible
- Technologies pas assez rentables
- Peu de confiance et de soutien
- Pas autorisé dans certains pays

Force du signal : Faible

Horizon temporel : Très long

Force de l'impact : Modéré

Groupe 10 : Capture et stockage du CO₂, Valorisation et hubs de carbone

Contexte climatique :

- Trop de carbone dans l'environnement
- Stockage dans différents puits (océans, végétation)
- Nécessité de stocker pour atteindre la neutralité carbone (certains secteurs ne pourront pas réduire leurs émissions)
- En 2019 : 45 GtCO₂/an
- Objectif 1,5°C en 2050 : capturer entre 5 et 16 GtCO₂/an

Technologies et valorisation :

1. Utilisation dans les bâtiments :
 - Fabrication de revêtements réagissant avec le CO₂ (peinture, enduits transformés en composés stables comme des carbonates)
2. Fabrication de matériaux :
 - Diamants synthétiques par conversion chimique du CO₂ en carbone solide
3. DAC (Direct Air Capture) :
 - Utilisation de filtres pour capter le CO₂ atmosphérique
4. Réseaux "hubs" de carbone :
 - Proches d'industries très émettrices
 - Association des sites de capture, stockage et revalorisation
 - Synergie avec l'utilisation dans les bâtiments

Impacts potentiels :

- Réduire l'effet de serre et l'augmentation de la température
- Revaloriser les émissions en les transformant en quelque chose d'utile

Limites identifiées :

- Assez faible pour la capture : diminution de la température de la terre de 0,7°C maximum
- Ne permet pas d'éliminer tout le CO₂ de l'atmosphère
- Chaque méthode peut polluer si trop utilisée :
 - Sols → nappes phréatiques
 - Océans → acidification
 - Conversion du carbone → très énergivore

Défis :

- **Technologiques** : rendement faible, peu rentable
- **Économiques** : dépendance au prix du carbone et aux soutiens publics
- **Réglementaires** : permis, responsabilité en cas de problème
- **Sociaux** : acceptabilité, perception "greenwashing", nécessité de transparence sur performances réelles et limites

Conclusion du groupe : "Utile pour les émissions industrielles incompressibles.
Impact limité sans réduction à la source et énergie bas-carbone."

Force du signal : Important

Horizon temporel : 2050

Force de l'impact : faible à modéré



Groupe 11 : Souveraineté européenne en matière de data centers

Problématiques identifiées :

- Explosion de l'utilisation de l'IA et omniprésence au quotidien
- Utilisation généralisée d'appareils électroniques
- Impact environnemental majeur (consommation électricité, ressources, matériaux)
- Questions éthiques
- Dépendance au numérique
- Enjeux de souveraineté

Stratégie proposée : Souveraineté européenne des data centers

Leviers réglementaires et techniques :

- Mise en place d'une réglementation sur la localisation des data centers en Europe
- Anticiper et réglementer leur localisation et la gestion de leur cycle de vie (matériel, liquides de refroidissement)
- Systèmes d'heures creuses pour optimiser la consommation
- Investir dans la R&D pour optimiser les techniques de refroidissement (écoconception)
- Contrôles qualité et audits réglementaires

Opportunités :

- Dépendance au prix de l'électricité (peut devenir un atout avec électricité décarbonée)
- Nouveau marché du travail et création d'emplois
- Contrôle des données en Europe
- Intégration territoriale des data centers (récupération de chaleur)
- Souveraineté européenne renforcée
- Utilisation de ressources locales

Risques et défis :

- Surcharge de la demande électrique
- Acceptabilité sociale (proximité avec habitations)
- Répercussion du prix de l'électricité sur les consommateurs
- Dépendance aux matières critiques pour les équipements
- Nécessité de nouveaux moyens de production d'électricité
- Compétitivité : technologies pas européennes
- Disponibilité énergétique insuffisante
- Coût économique élevé

Force du signal : Modéré

Horizon temporel : 2040-2050

Groupe 12 : Intelligence artificielle générative en milieu scolaire

Constats :

- 10% des requêtes sur ChatGPT sont à but scolaire (sur 2,5 milliards de requêtes/jour)
- 80% à 90% des étudiants utilisent l'IA
- Dépendance à l'IA et manque de réflexion par soi-même
- Une requête IA consomme 5 à 10 fois plus qu'une recherche Google

Game Changer proposé : Prise en compte de l'IA générative dans le milieu scolaire

Mesures éducatives :

- Cours d'utilisation de l'IA : données auxquelles elle a accès, fonctionnement, création d'une réponse, niveau de confiance approprié
- Cours de sensibilisation sur l'impact environnemental de l'IA
- Logiciels de vérification de l'utilisation de l'IA dans les devoirs
- Sensibilisation aux alternatives à l'IA
- Création d'une IA plus spécifique au milieu scolaire

Bénéfices attendus :

- La France plus compétitive sur l'utilisation d'IA et sur le marché du travail
- Plus grande transparence sur l'utilisation de l'IA à but scolaire
- Économique : plus grande efficacité et meilleure productivité
- Environnemental : plus grande conscience de l'impact environnemental
- Social : meilleure compréhension de l'IA et de son utilisation par tous
- Culturel : intégration de l'IA dans la culture et l'éducation

Risques :

- Perte de compétences (capacité de réflexion, confiance en soi)
- Remplacement de métiers par des IA
- Disparité au niveau de l'emploi

Verrous :

- **Individuel** : problème de mentalité, accès facilité à l'information (peut être à double tranchant)
- **Collectif** : nécessité de s'accorder sur de nouvelles réglementations, formation des professeurs, coût économique

Force du signal : Modéré

Horizon temporel : Court terme

Groupe 13 : Prévention des méga-feux de forêt à l'échelle mondiale

Constats :

- Multiplication des méga-feux dans le monde (Canada, États-Unis, Grèce, France)
- Chaleurs extrêmes, sécheresses, inondations, cyclones, tempêtes, vagues de froid extrême, avalanches, feux de forêt
- Conditions de propagation : vitesse du vent (+30 km/h), température (+30°C), humidité (<30%)
- 90% des feux de forêt sont d'origine humaine en France

Leviers proposés :

- Redesign des forêts : création de dunes (animaux), quadrillages + plantes pyrophytées
- Interdiction d'accès aux forêts lorsque les conditions de propagation sont réunies
- Barrières provisoires de plexiglas pour quadriller le feu au départ de l'incendie

Opportunités :

- Forêts plus sûres, randonnées et promenades plus sécurisées
- Meilleure exploitation des forêts
- Besoin accru de débroussailler : la biodiversité reprend le dessus

Risques :

- Espèces invasives
- Perturbation de la biodiversité

Verrous :

- Attention aux espèces invasives (dopage des arbres)
- Politiques publiques : frais, recherches, mise en place
- Associations de protection de l'environnement : accord sur l'utilisation des OGM, défrichage

Force de l'impact : Majeure



Groupe 14 : Géo-ingénierie – Ensemencement des nuages

Contexte :

- Multiplication des épisodes de sécheresse
- Augmentation de la température = perturbation du cycle de l'eau → manque de pluie
- Manque d'eau dans les sols et nappes phréatiques
- Affectation de l'agriculture, manque d'eau potable, risque de famine

Technologie proposée :

- **Méthodes :**
 - Avions traversant les nuages
 - Canons/générateurs au sol
- **Substance principale :**
 - Iodure d'argent (agent de nucléation)
 - Problème : substances polluantes, l'argent est considéré comme polluant prioritaire par l'EPA
- **Bénéfices espérés :**
 - Contrôle des apports hydriques en agriculture → meilleurs rendements hypothétiques
 - Diminution locale de la sécheresse

Risques majeurs identifiés :

- **Environnementaux :**
 - Résultats imprévisibles
 - Pluies excessives locales
 - Pollution des sols
 - Perturbation des moussons
 - Manque de données sur l'écotoxicité
- **Géopolitiques :**
 - Risques géopolitiques importants
 - Application possible pour inonder des pays voisins
 - Exemple historique : utilisation au Vietnam pour intensifier la mousson
- **Sociaux :** Inégalités d'accès à la technologie
- **Éthiques :** Discussions sur l'omnipotence humaine

Obstacles majeurs :

- Méfiance du public et beaucoup de désinformation
- Peu de recul sur les conséquences environnementales
- Tensions géopolitiques potentielles

Force du signal : Modéré

Horizon temporel : Court terme

Groupe 15 : Prévention et adaptation face aux inondations

Constats :

- 2 fois plus d'inondations depuis les années 90
- Montée des eaux et érosion côtière
- 12 000 catastrophes liées au changement climatique
- Réfugiés climatiques
- Problèmes de santé publique (hygiène, eau potable)

Stratégie : Gestion des inondations par prévention et adaptation

Leviers proposés :

- Prévision précise des événements (nouvelles technologies)
- Normes de construction et adaptation des villes aux enjeux
- Gestion géo-hydrographique (bassins de rétention, canaux, zones d'expansion des crues)
- Préparation des populations (formation, protocoles d'évacuation)

Opportunités :

- Nouveaux emplois dans la gestion des risques et les infrastructures
- Confort accru (économique et social)
- Réponse rapide et adaptée de la population
- Santé mentale et physique préservée
- Villes plus solides (modernisation du bâti)
- Nouvelles normes de construction
- Préservation du patrimoine historique et culturel
- Émulation entre villes pour la mise en place de dispositifs

Impacts :

- **Social** : sécurité renforcée
- **Écologique** : infrastructures à lourd impact local (animaux, sols, paysage), mais potentiel de création de zones humides et préservation des cours d'eau
- **Économique** : positif à long terme malgré de forts investissements à court terme
- Impact inégal suivant l'isolement géographique et les ressources disponibles

Risques et défis :

- Coût important des infrastructures lourdes
- Impact local variable
- Désinformation (formation malhonnête sur les risques)
- Accès inégal à l'information
- Rupture potentielle des infrastructures

- Accès aux ressources agricoles compromis
- Nécessité de coopération des municipalités et des populations
- Inégalités économiques

Horizon : 2030 et 2050

Force du signal : Faible à modéré à court terme

Force de l'impact : Significatif à long terme



Groupe 16 : SMR et EPR – Les nouveaux réacteurs

Contexte :

- Stagnation voire baisse de l'énergie nucléaire au profit des énergies renouvelables dans certains pays
- Besoin d'électrification et de stabilité tout en conservant une possibilité de modulation (offre et demande)
- Développement de nouvelles technologies (miniaturisation, évolution)
- Fermeture de certaines centrales
- Besoin de reconstruire des compétences

Technologies envisagées :

- EPR (European Pressurized Reactor) : nouvelle génération de réacteurs de grande puissance
- SMR (Small Modular Reactors) : réacteurs modulaires de petite taille
- Réacteurs à neutrons rapides : permettent de réutiliser les déchets nucléaires

Opportunités identifiées :

- Avoir de nouveau des compétences dans le nucléaire et une industrie capable de construire des centrales
- Réutilisation des déchets avec les neutrons rapides
- Souveraineté électrique (une centaine d'années d'autonomie avec les neutrons rapides)
- Continuer l'électrification du mix énergétique
- Améliorer le rendement (proximité des utilisateurs avec les SMR)
- Décarbonation et énergie non intermittente
- Création de nouveaux emplois
- Aide à l'hydraulique (rechargement des barrages en heures creuses)
- Électrification de l'industrie
- Co-production de chaleur et électricité pour des réseaux locaux
- Couverture territoriale thermique et électrique par une matrice de SMR

Impacts sociétaux :

- Réveil des conflits entre pro et anti-nucléaire
- Transformation du commerce d'énergie (du fossile au nucléaire)
- Occupation et transformation du territoire

Risques et freins :

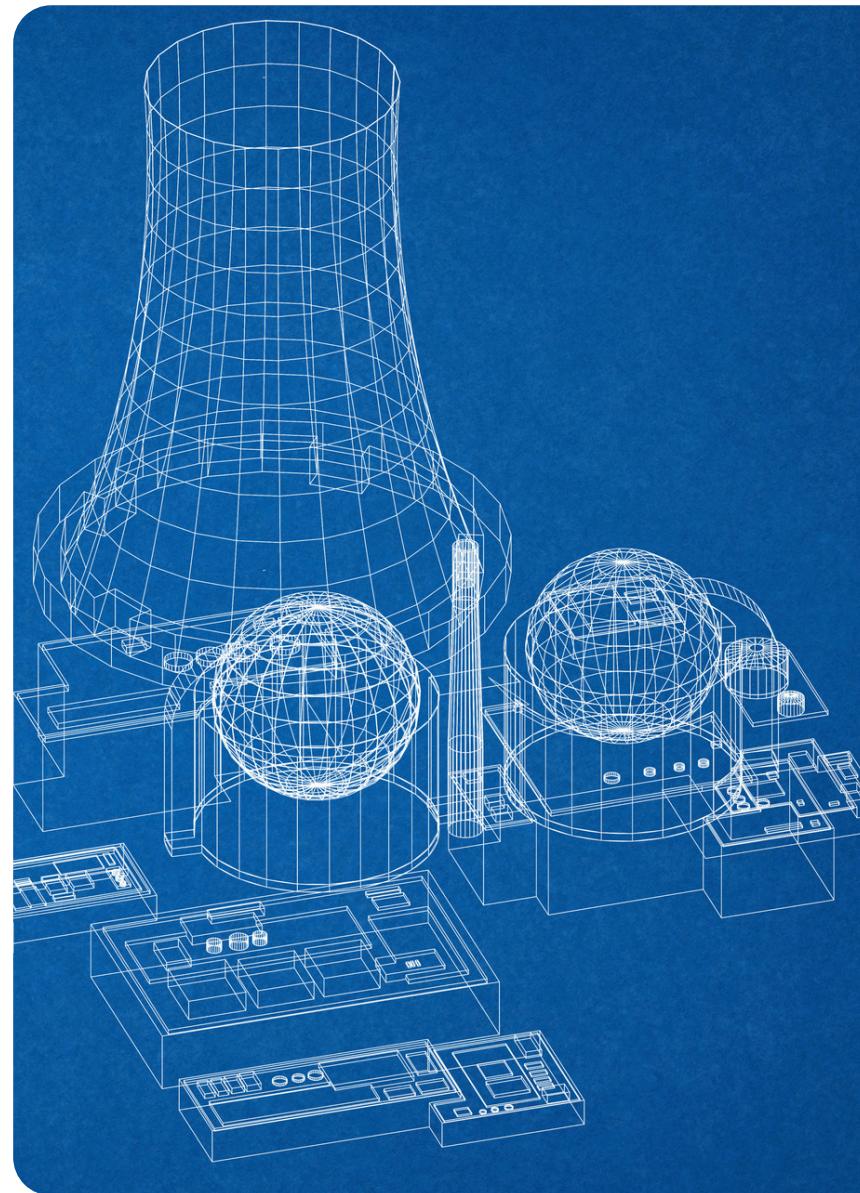
- Acceptabilité sociale persistante
- Homogénéisation nécessaire des normes réglementaires (européennes, internationales)
- Perte de compétences ("Cela fait longtemps qu'on ne construit plus de centrales")

- Investissement instantané pour un résultat reporté
- Radiation (perception du risque)
- Dérives vers le nucléaire militaire
- Vulnérabilité en cas de conflits armés
- Explosions (accidents)
- Question de l'égalité d'accès entre les pays
- Privatisation potentielle de la technologie par les entreprises (data centers)
- Délais de construction (les premiers EPR ont mis des années)

Force du signal : Modéré

Horizon temporel : 2040-2060

Force de l'impact : Significatif



Groupe 17 : La fusion nucléaire - "C'est la pipocalypse"

Contexte fission :

- Parc européen : 100 GW actuellement, objectif 150 GW en 2050
- France : projet de loi sur l'accélération du nucléaire

Recherche sur la fusion (ITER) – qualifiée d'"utopie" :

Deux réactions de fusion possibles :

1. Tritium-deutérium
 - D : 0,018% dans les océans
 - T : fabriqué avec du lithium
 - Équilibre instable
2. Hélium-3
 - Réaction aneutronique
 - Conversion directe en électricité
 - Grand stock sur la Lune (!)

Avantages théoriques :

- Rendement 4 fois supérieur à la fission
- 1 kg d'He-3 équivaut à 10 000 tonnes de charbon ou 100 kg d'uranium
- Réaction aneutronique avec l'He-3 (moins dangereuse, meilleure durée de vie des matériaux)
- Eau potable illimitée (production par sous-produit)
- Recyclage infini du plastique
- Quasi-zéro émission de CO₂
- Déchets nettement moins dangereux que la fission
- Pas de risque de catastrophe nucléaire majeure

Impacts sociétaux hypothétiques :

- **Social** : démocratisation de l'énergie, limitation des conflits, l'énergie devient moins rare → changement des rapports géopolitiques
- **Économique** : réduction du coût de l'énergie à long terme, création d'une nouvelle filière industrielle
- **Environnemental** : déchets moins dangereux, destruction des anciennes infrastructures, standardisation de la conception

Risques et obstacles majeurs :

- Rareté du tritium
- Compétition pour le lithium avec la fabrication des batteries
- Hélium-3 sur la Lune : coûts ? infrastructures ? pollution ? conflits ? (exploitable pour "le bien commun" ?)
- Opinion publique et désinformation

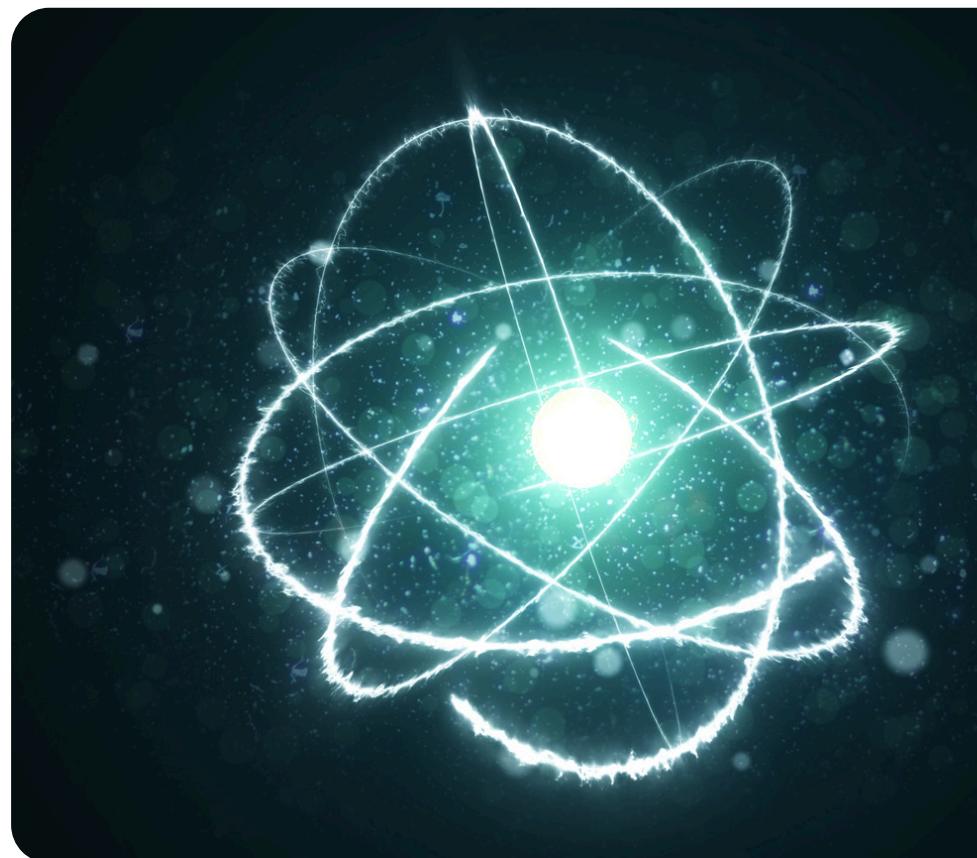
- Risque d'instabilité et de dépendance du réseau
- Nombreux investissements en matière et développement
- Monopole énergétique déstabilisant le marché
- Danger lié au réseau de distribution
- Anciens réseaux énergétiques désuets
- À court terme : crash boursier, crise économique des pays pétroliers
- Effondrement de l'ordre mondial à court terme
- Manque de sobriété dans la consommation (effet rebond massif)
- Désorganisation du monde

Position du groupe : "Critique +++ (c'est la pipocalypse)"

Force du signal : Omniprésent (dans les discours, pas dans la réalité)

Horizon temporel : 2060+ (très long terme)

Évaluation : Vision utopique, risques systémiques majeurs



Groupe 18 : Parc chimique éco-industriel - Symbiose industrielle

Contexte :

- Industrie chimique : 5% des émissions mondiales de GES, 6% du PIB global
- France : 2ème producteur européen
- Sources d'émission : chauffage des procédés (combustion charbon/gaz), vaporeformage du méthane

Concept proposé : Symbiose industrielle

- Principe :
 - Rapprocher les industries chimiques des centrales nucléaires ("hubs")
 - Électrification des usines chimiques (avec générateurs d'urgence de secours)
 - Réutiliser les sites industriels existants mais arrêtés
 - Couplage des déchets par symbiose industrielle : "supercycling"
- Fonctionnement :
 - Les déchets des uns servent aux autres industries
 - Le méthane issu des déchets ménagers est utilisé pour produire du dioxygène
 - Production électrique nucléaire proche de l'usine (pas besoin de transport longue distance)

Avantages :

- Production électrique décarbonée à proximité (pas besoin de transport)
- Pratique car "il n'y a rien autour" (zones isolées)
- Évitement de la taxe carbone
- Plus grande compétitivité : création d'un marché premium de chimie verte
- Moins de dépendance aux importations de gaz et de pétrole
- Acceptabilité facilitée des industries (regroupement)
- Création d'emplois
- Décarbonation "à la racine" facilitant la transition des autres industries
- Favorise l'économie locale
- Moins de zones à risque (concentration géographique)

Défis et risques :

- Les entreprises ne souhaiteront pas déplacer leurs usines (raisons économiques)
- Inégalité de la transition (petites entreprises vs grands industriels)
- Réticence des employés et habitants à proximité des usines
- Verrous technologiques : transport d'énergie et de chaleur, capacité limitée des câbles aux heures de pointe
- Risques de sécurité : usine chimique proche d'une centrale nucléaire
- Devenir des anciennes usines (risque de pollution résiduelle)
- Risque de panne si trop de dépendance au réseau électrique

- Difficile pour les employés de se rendre au travail (sites éloignés, impact environnemental du transport)
- Augmentation potentielle du prix de l'électricité avec l'électrification de la chimie

Échéance : 2050 ou après

Force du signal : Modéré à Fort

Force de l'impact : Majeur (l'industrie chimique est essentielle et très émettrice)

Groupe 19 : Mutualisation des ressources entre industries

Problématiques identifiées :

- Décarbonation vs compétitivité
- Dépendance aux énergies fossiles pour la production d'hydrogène
- Émissions de CO₂ lors des procédés
- Rôle central de l'hydrogène dans l'industrie chimique
- Question : "Disparition de la pétrochimie ? → difficile à concevoir"

Concept : Mutualisation des ressources entre industries

Avantages :

- Gratuité des matières premières (déchets)
- Diminution des risques chimiques (transport)
- Moins de pertes et fuites
- Zones de logistique facile d'accès
- Impact local et social : création "d'écosystèmes" industriels
- Contrôle facilité des rejets de polluants

Risques :

- Acceptabilité sociale
- Accidents chimiques potentiellement décuplés (concentration)
- Modèle économique à définir (don ou vente de déchets ?)
- Temps long (construction d'infrastructures)

Verrous :

- **Économiques** (rentabilité)
- **Sociaux** (acceptabilité des populations)

Force du signal : Nul / Faible

Horizon temporel : Long terme

Groupe 20 : Taxe de transit - Souveraineté européenne

Diagnostic :

- Délocalisation importante depuis 1970 (fin des Trente Glorieuses)
- France dépendante en énergie de puissances étrangères
- Transport = grand enjeu écologique pour l'industrialisation
- Industrie historique dans le Nord, industrie nouvelle en croissance dans le Sud
- Coût de production élevé en France (salaires, normes de sécurité, accès aux matières premières)
- Opposition populaire vis-à-vis de l'industrie ("sale", "gênante", "polluante")
- Manque de ressources en France (métaux critiques)

Constat clé : "L'électricité étant principalement décarbonée en France, un des enjeux écologiques les plus importants de notre production industrielle est le transport des matériaux et marchandises vers les sites de production."

Mécanisme proposé : Taxe de transit pondérée par le bilan carbone

Principe :

- Taxe sur les importations en fonction du mode de transport (avion, train, porte-conteneurs)
- Réinvestissement des bénéfices dans l'industrie française

Objectifs :

- Les importations étrangères coûtent plus cher
- Les produits français deviennent moins coûteux (grâce au réinvestissement)
- On limite d'autant plus les importations qu'elles sont polluantes

Bénéfices attendus :

- Encouragement au développement d'industries françaises (relocalisation)
- Moins de dépendance vis-à-vis d'autres pays (notamment grandes puissances industrielles)
- Protection du pouvoir d'achat des Français (réinvestissement dans la production de produits de nécessité verts)
- Consommation facilitée de produits français (coût plus bas, produits verts)
- On force les importations les plus polluantes à diminuer
- Protection des entreprises en France
- Résilience vis-à-vis des chocs externes

Risques :

- Concurrence des autres pays qui baissent énormément leurs coûts
- Baisse du pouvoir d'achat à court terme (nécessité de subvention temporaire)

- Filières essentielles peu implantées en France (lithium) : la production ne suit pas les besoins
- Rétorsion commerciale : représailles sur des filières d'exportation françaises (vin, luxe, fromage, médicaments)

Verrous :

- Coût de production élevé sur le territoire (salaires, normes de sécurité, accès aux matières premières)
- Opposition populaire vis-à-vis de l'industrie
- Manque de ressources correspondantes en France

Force du signal : Faible à court

Horizon temporel : 2030-2040-2050

Force de l'impact : Faible à court terme, potentiellement significatif à long terme, résilience vis-à-vis des chocs



Groupe 21 : Filiale de recyclage des terres rares critiques

Constats :

- Importations > 90% en terres rares, cobalt, lithium
- Enjeux géopolitiques avec régimes contestés (Chine, RDC, Birmanie)
- Conditions de travail peu éthiques (délocalisations)

Stratégie : Filière européenne de recyclage des terres rares

Leviers technologiques :

1. Massification de la logistique inversée :
 - Création de hubs de collecte sécurisés
 - Absorber le "tsunami" de batteries en fin de vie (volume x10 d'ici 2030)
 - Existe déjà pour les voitures, à étendre
2. Recherches technologiques :
 - Séparer les matériaux critiques à faible coût
3. Rupture technologique – Hydrométaallurgie :
 - Procédé chimique basse température (<80°C)
 - Permet de récupérer +95% des matériaux (dont le lithium)
 - Empreinte carbone minimale

Bénéfices attendus :

- Souveraineté industrielle et économique : UE redevient exportatrice
- Développement de l'économie locale
- Renouvellement de l'industrie des batteries (téléphonie)
- Social : création d'emploi, empêcher la fuite des cerveaux, conditions de travail contrôlées
- Environnemental : moins d'émissions liées aux importations
- Économique : amélioration de la balance commerciale (import/export)
- Recherche technologique française renforcée
- Culturel : conscience du recyclage en France

Risques et défis :

- Conflits géopolitiques (guerre en Ukraine, Chine) et sanctions économiques
- Augmentation du prix des exportations de matières premières
- Concurrence, viabilité du modèle économique de l'usine
- Rendement des usines et nécessité de réunir suffisamment de matériaux critiques
- Enjeu de conscience collective au recyclage
- Dépend du marché des batteries (donc indirectement US/Chine)

Force du signal : Faible / Modéré
Horizon temporel : 2040
Force de l'impact : Majeur à long terme

