

Le cuivre dans les transports (~ 3 pts)

En 2025, le parc mondial de voitures individuelles est de 1.5 milliard de voitures avec une production annuelle de véhicules neufs équivalente à 6% du parc. Les voitures actuelles (considérées toutes équipées d'un moteur à combustion) contiennent 30 kg de cuivre par véhicule. Les véhicules électriques nécessiteraient 3 fois cette quantité de cuivre.

La production annuelle de cuivre p peut être modélisée par l'équation : $p = p_0 \exp[r(t - t_0)]$ avec $t_0 = 2020$ $r = 3.15\%$ et $p_0 = 20$ Mt.

Question 4 Quelle est la masse de cuivre nécessaire pour la production de voitures neuves à moteur à combustion en 2025 (en Mt), en supposant qu'il n'y ait pas de recyclage ?

☐0 ☐1 ☒2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7 ☐8 ☐9

0.5/0.5

☐0 ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☒7 ☐8 ☐9

Question 5 Quelle quantité de cuivre supplémentaire faudrait-il pour électrifier 100% des voitures neuves produites en 2025 (en Mt), en supposant qu'il n'y ait pas de recyclage ?

☐0 ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☒5 ☐6 ☐7 ☐8 ☐9

0.5/0.5

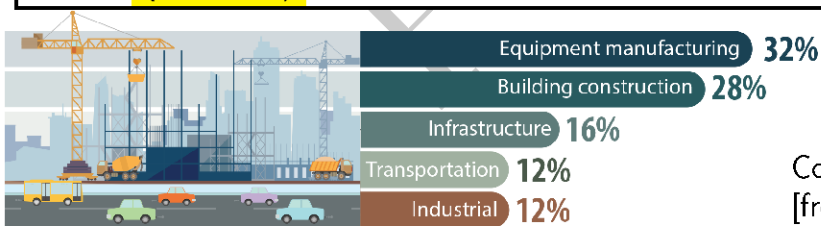
☐0 ☐1 ☐2 ☐3 ☒4 ☐5 ☐6 ☐7 ☐8 ☐9

Question 6 Après avoir calculé la production de cuivre en 2025, calculer la part que représente la quantité supplémentaire de cuivre.

☐Empty ☐0 ☐0.5 ☒1 1/1

A partir de $p = p_0 \exp[r(t - t_0)]$, nous calculons la production en 2025 : $p(2025) = 23.4$ Mt (0.5 pts).

Le cuivre supplémentaire nécessaire à la construction des voitures électriques est d'environ un quart (23%) de la production de cuivre actuelle. (0.5 pts).



Copper, global uses, 2022
[from <https://natural-resources.canada.ca>]

Question 7 En utilisant la répartition de cuivre donnée ci-dessus, concluez sur la question précédente.

☐Empty ☐0 ☐0.5 ☒1 1/1

Une augmentation de 23% de la production de Cu dans les transports (i) modifierait radicalement la répartition du Cu (les transports passeraient de 12% à plus de 30%) si la production est constante (0.5 pts) ou (ii) nécessiterait une production supplémentaire massive de Cu (0.5 pts).

Poids des avions et émissions de CO₂ de l'aviation¹ (~ 9 pts)

L'objectif de cet exercice est de comprendre la relation entre le poids des avions et les émissions de CO₂ dans le secteur de l'aviation.

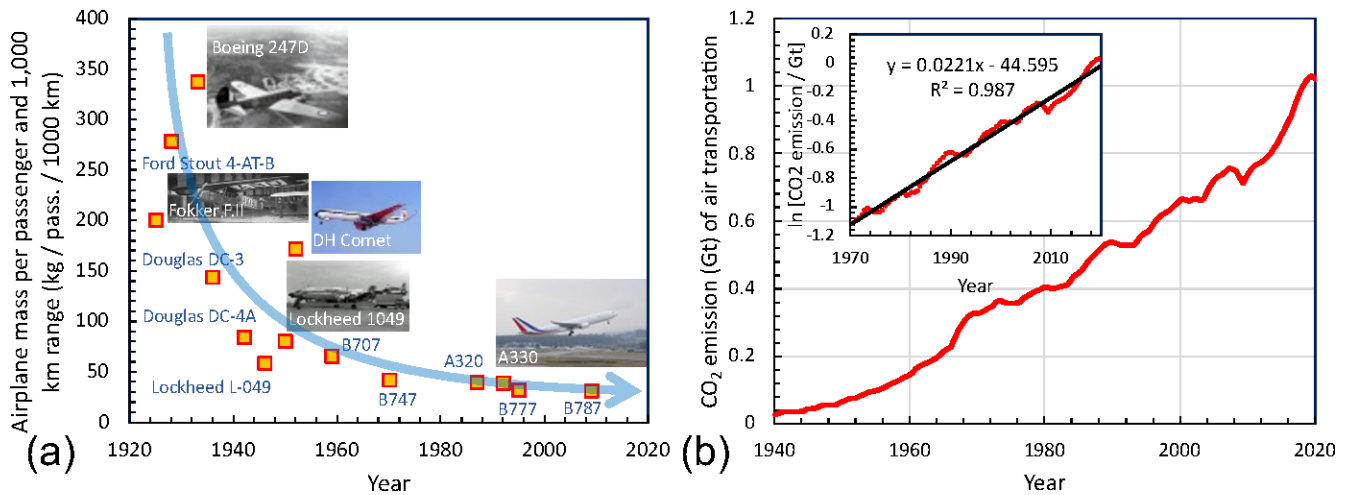


FIGURE 1 – (a) Évolution de la masse des avions par passager et par 1000 km de rayon d'action (d'après [Eymann *et al*, JA2024, Paris (2024)]). (b) Évolution des émissions de CO₂ dues au trafic aérien ; en insert : même graphique à l'échelle semi-log (données de [Bergero *et al*, Nature Sustainability, 6 (2023)].)

Question 8 Que pouvez-vous conclure des figures 1 (a) et (b)?

Empty 0 0.5 1 1/1

Malgré des progrès technologiques impressionnants dans la réduction du poids des avions (figure 1(a)) (0.5 pts), les émissions de CO₂ dues au trafic aérien continuent d'augmenter de façon exponentielle. (figure 1(b)) (0.5 pts).

Question 9 D'après la figure 1(b), la croissance des émissions de CO₂ est :

0.5/0.5 ☒ exponentielle. ☐ logarithmique. ☐ linéaire. ☐ parabolique.

Question 10 À partir de la figure 1(b), donnez le taux de croissance moyen (en %/an) des émissions de CO₂ entre 1970 et 2010.

0.5/0.5

$$\begin{array}{l} \boxed{\times} + \begin{array}{cccccccccccc} \boxed{0} & \boxed{1} & \boxed{\times} & \boxed{2} & \boxed{3} & \boxed{4} & \boxed{5} & \boxed{6} & \boxed{7} & \boxed{8} & \boxed{9} \end{array} \\ \boxed{} - \begin{array}{cccccccccccc} \boxed{0} & \boxed{1} & \boxed{\times} & \boxed{2} & \boxed{3} & \boxed{4} & \boxed{5} & \boxed{6} & \boxed{7} & \boxed{8} & \boxed{9} \end{array} \end{array}$$

1. Tiré de : M. Eymann *et al*, “Progrès en sciences des matériaux, allègement des structures et augmentation des émissions de CO₂”, JA2024, Paris (2024)



Construction d'un modèle pour prédire l'effet du poids des avions sur les émissions de CO₂. Dans le secteur de l'aviation, il est admis que la réduction relative du poids de l'avion m est égale à la réduction relative de la consommation de kérosène C_k : $\Delta m/m = \Delta C_k/C_k$. Une diminution relative de 10% du poids de l'avion entraîne une réduction de 10% du coût relatif du kérosène. Soit η , la masse de CO₂ émise par passager.km. Elle est proportionnelle à la consommation de kérosène C_k , qui est proportionnelle au coût du kérosène P_k : $\eta \propto C_k$ et $C_k \propto P_k$.

Enfin, en 2025, le coût du kérosène P_k représente 33% du prix P du billet d'avion payé par les passagers. Les 67% restants étant d'autres coûts **constants**.

Question 11 Quelle est la relation entre la masse m_{CO_2} de CO₂ émise, le nombre de passagers.km N_{pkm} et la masse η de CO₂ par passager.km :

0.25/0.25



$\eta = N_{pkm} \times m_{\text{CO}_2}$



$m_{\text{CO}_2} = N_{pkm} \times \eta$



$N_{pkm} = m_{\text{CO}_2} \times \eta$

Question 12 Quelle est la relation entre la masse m_{CO_2} de CO₂ émise, le nombre de passagers.km N_{pkm} et la masse η de CO₂ par passager.km (et leur variation) :

0.25/0.25



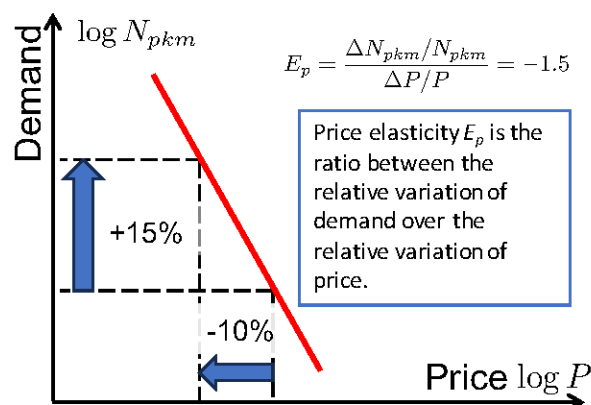
$\frac{\Delta \eta}{\eta} = \frac{\Delta N_{pkm}}{N_{pkm}} + \frac{\Delta m_{\text{CO}_2}}{m_{\text{CO}_2}}$



$\frac{\Delta m_{\text{CO}_2}}{m_{\text{CO}_2}} = \frac{\Delta N_{pkm}}{N_{pkm}} + \frac{\Delta \eta}{\eta}$



$\frac{\Delta N_{pkm}}{N_{pkm}} = \frac{\Delta m_{\text{CO}_2}}{m_{\text{CO}_2}} + \frac{\Delta \eta}{\eta}$



Question 13 L'élasticité-prix E_p est le rapport entre la variation relative de la demande et la variation relative du prix (comme écrit figure ci-contre). Dans notre cas, on suppose qu'elle est égale à $E_p = -1.5$, i.e. une diminution relative de 10% des billets d'avion donne une augmentation relative de 15% de la demande (i.e. du trafic aérien). Par conséquent, si la masse de l'avion diminue, la consommation de kérosène diminuera, le prix du billet d'avion diminuera, ce qui entraînera une augmentation de la demande de trafic aérien. Comment appelle-t-on cet effet ?

☐ Empty☐ 0☒ 0.5

Effet rebond ou paradoxe de Jevons (0.5 pts)

Question 14 Quelle est la relation entre ΔP et ΔP_k ?

☐ Empty☐ 0☐ 0.5☒ 1

1/1

$$P = P_k + \text{Cste} \Rightarrow \Delta P = \Delta P_k$$

Question 15 Précisez la (les) relation(s) correcte(s) :

1.5/1.5



$\frac{\Delta N_{pkm}}{N_{pkm}} = -\frac{E_p \Delta P}{P}$



$\frac{\Delta N_{pkm}}{N_{pkm}} = -E_p \frac{\Delta P_k}{P_k}$



$\frac{\Delta N_{pkm}}{N_{pkm}} = \frac{E_p \Delta P}{P}$



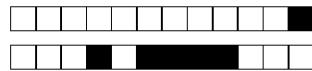
$\frac{\Delta N_{pkm}}{N_{pkm}} = E_p \frac{\Delta m}{m} \frac{P_k}{P}$



$\frac{\Delta N_{pkm}}{N_{pkm}} = -E_p \frac{\Delta m}{m} \frac{P_k}{P}$



$\frac{\Delta N_{pkm}}{N_{pkm}} = E_p \frac{\Delta P_k}{P_k}$



Question 16 Démontrez que la relation entre le gain de masse et le gain d'émission de CO₂ est : $\Delta m_{\text{CO}_2}/m_{\text{CO}_2} = (\Delta m/m)(1 + E_p P_k/P)$.

☐ Empty ☐ 0 ☐ 0.5 ☐ 1 ☒ 1.5 1.5/1.5

D'après la question précédente, on a : $\frac{\Delta m_{\text{CO}_2}}{m_{\text{CO}_2}} = \frac{\Delta N_{pkm}}{N_{pkm}} + \frac{\Delta \eta}{\eta}$.

L'élasticité-prix donne : $\frac{\Delta m_{\text{CO}_2}}{m_{\text{CO}_2}} = E_p \frac{\Delta P_k}{P_k} \frac{P_k}{P} + \frac{\Delta \eta}{\eta}$ (0.5 pts)

Comme $\eta \propto C_k \propto P_k$, $\frac{\Delta P_k}{P_k} = \frac{\Delta C_k}{C_k} = \frac{\Delta m}{m}$.

De même, $\frac{\Delta \eta}{\eta} = \frac{\Delta C_k}{C_k} = \frac{\Delta m}{m}$ (0.5 pts).

ce qui donne finalement : $\frac{\Delta m_{\text{CO}_2}}{m_{\text{CO}_2}} = \frac{\Delta m}{m} \left(1 + \frac{E_p P_k}{P} \right)$ (0.5 pts).

Question 17 Quelle est la valeur numérique de l'amplitude relative du terme $E_p P_k/P$?

0.5/0.5

☐ + ☒ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
☒ - ☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9

Question 18 Citez deux facteurs techniques expliquant pourquoi la masse spécifique des avions (masse par passager et par 1 000 km de rayon d'action) a diminué au cours des 80 dernières années (voire figure 1)(a)).

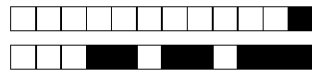
☐ Empty ☐ 0 ☐ 0.25 ☒ 0.5 0.5/0.5

Progrès dans les domaines de la science des matériaux (0.25 pts) et de l'aérodynamique (0.25 pts).

Question 19 Que pouvez-vous conclure sur la relation entre les figures 1 (a) et (b) ?

☐ Empty ☐ 0 ☐ 1 ☒ 2 1/1

Des progrès scientifiques et technologiques massifs ont permis d'alléger les avions. Cela a permis de réduire les émissions de CO₂ (0.5 pts), mais environ la moitié de ces progrès sont perdus en raison de l'effet de rebond (0.5 pts). D'autres effets (facteurs de charge des avions, progrès des moteurs, etc) expliquent la baisse des prix des billets d'avion.



Densification urbaine (~ 6 pts)

Le retour de l'habitat vertical et les politiques TOD (Transit Oriented Development) dans les villes françaises : vers une intensification urbaine socialement sélective ?²

Introduction Plus nombreuses et paradoxalement moins analysées que des tours de bureaux décrites en tant qu'emblèmes du capitalisme (Didelon, 2010), les tours résidentielles font leur retour dans le paysage des villes françaises avec 97 projets recensés en janvier 2018. Livrées, en construction, ou simplement approuvées, elles mettent fin à une période [...] d'environ 30 ans, au cours de laquelle aucune tour ou presque n'a émergé (Appert, 2016). Toutefois, peu [documenté] ainsi que légèrement plus tardif que dans le reste de l'Europe, le retour des tours résidentielles en France n'est pas un phénomène isolé. [...] De Londres à Rotterdam en passant par Francfort, Barcelone, Milan, Malmö ou encore Lyon, le phénomène urbain de verticalisation résidentielle interroge [...]. Le retour de la tour de logement illustre un véritable changement de paradigme entre la promotion de la croissance urbaine via le développement des périphéri(que)s à l'ère du tout voiture [Chamboredon et Le maire, 1970] et la lutte contre l'étalement urbain (Estèbe, 2004). [...] Comment expliquer le retour des tours résidentielles aujourd'hui en France ?

La construction de tours de logements dans le contexte lyonnais Le retour des tours de logements à Lyon s'appréhende à l'œil nu, à travers l'émergence de 6 réalisations situées sur le périmètre du Grand Lyon [...]. Les localisations des tours contemporaines lyonnaises sont mises sur [la même carte] que leurs homologues plus anciennes dans le périmètre du Grand Lyon (figure 2) [...].

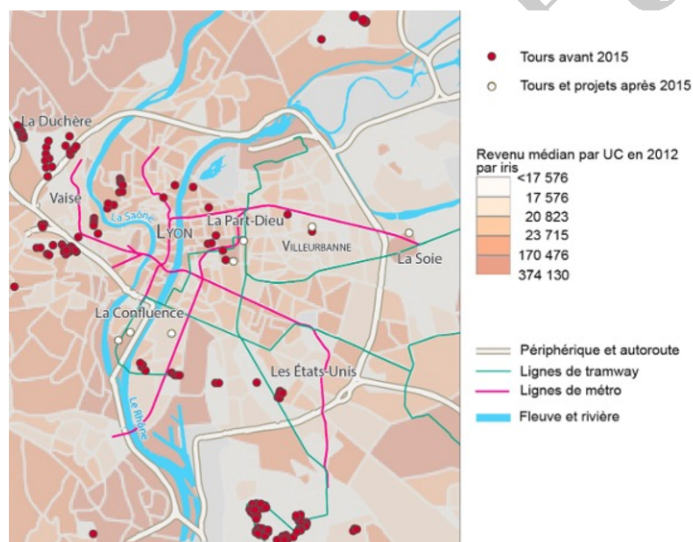


Figure 2 : Localisation des tours résidentielles à l'échelle du Grand Lyon (Mathian et Bouron, 2019) [UC : unité de consommation]

Les tours contemporaines, péricentrales, sont plus proches du centre de la ville de Lyon que les autres, situées

majoritairement dans les communes périphériques de Villeurbanne avec le quartier du Tonkin, Vénissieux ou encore la Duchère et Rillieux-la-Pape. L'intégration aux réseaux de transports dits lourds pour les tours contemporaines est manifeste, ce qui est moins le cas pour les autres tours, davantage reliées aux réseaux (auto)routiers. [...]

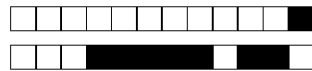
Les principes des politiques Transit Oriented Development (TOD) Les politiques dites Transit Oriented Development, ou d'urbanisme orienté transport, sont des incarnations de l'urbanisme de la ville compacte (Bentayou et al, 2015). Elles visent à coordonner le développement des réseaux de transports collectifs à l'urbanisation dans la perspective de réduire le nombre et la longueur des déplacements motorisés. Sur la base de ces principes, les TOD formalisent des dispositifs visant à réduire l'étalement urbain et la dépendance à l'automobile telle qu'elle s'est peu à peu constituée pendant les Trente Glorieuses [1945-1975]. [...]

Peter Calthorpe (1993, p. 56), initiateur des TOD, les a définis comme des quartiers à usage mixte à proximité des nœuds de transports collectifs dans le péricentre des villes. Les TOD associent les fonctions résidentielles, commerciales, tertiaires, récréatives et civiques dans des quartiers où l'usage des modes doux devrait être privilégié. Les TOD, selon Peter Calthorpe, reposent sur quatre principes. D'abord, une mixité de logements, de services et d'emplois sont articulés autour d'espaces publics permettant de relier les nœuds de transport collectif [arrêts de tramway, stations de métro, gares...]. Ensuite, l'environnement bâti et piétonnier doit être attractif et sécurisé pour les usagers des modes doux. Troisièmement, l'aménagement de TOD compacts est à planifier à l'échelle métropolitaine et à réaliser le long de corridors de transport collectif, sur des sites vacants ou à requalifier (brownfields). Enfin, ces aires doivent être localisées préférentiellement à l'intérieur de l'espace bâti des villes afin de contenir l'étalement urbain. [...]

Deux figures des tours résidentielles en France

Si la tour d'habitation contemporaine est reliée dans les discours aux modalités de l'intensification urbaine, à travers la compacité, comprenant les mobilités et l'injonction environnementale, [...] des ensembles résidentiels moins hauts ne sont-ils pas susceptibles de véhiculer tout autant des dynamiques de polarisation ? La tour est justifiée entre autres par les TOD mais cela ne suffit pas. Or la tour résidentielle nouvelle génération est bien légitimée par les acteurs [de la construction des villes] par rapport à la figure de la tour d'habitat social qui pèse encore dans les représentations collectives de la ville. Ou est-ce une question de design ? Les tours contemporaines, moins nombreuses,

2. Extrait d'un article de G. Mollé, M. Appert and H. Mathian, Logements et espaces de résidences contemporains : 2019/3 (2019) [UC = consumption unit, a ratio based on income and household size ; Iris = a spatial unit used in statistics]



semblent plus iconiques que les anciennes réalisations bien que partageant la même morphologie verticale. Mais alors, s'adressent-elles aux mêmes populations ?

Lors de son apparition dans le paysage urbain, la tour d'habitation, alors plutôt réservée à l'habitat social, incarne au départ une vision équitable de la ville à travers le crédo « un logement pour tous ». Associée à la barre [d'immeuble] (Fortin, 2005), bien que comparativement moins répandue, elle symbolise grâce à son élancement caractéristique le paradigme de la ville moderne, flambant neuf dans sa monumentalité et plein d'espoirs. [...] Plus que dans d'autres pays européens, la France accuse la forme et stigmatise la tour. Son élancement en fait l'un des coupables des maux sociaux d'une époque. La fin des Trente Glorieuses, concomitante de l'explosion du chômage, le premier choc pétrolier, entretiennent dans les villes un climat tendu. Parfois construites dans l'urgence, les tours d'habitat social deviennent les figures de proue de la paupérisation de quartiers périphériques enclavés et précaires. Le retentissement de la rénovation urbaine, particulièrement intense à partir de 2003 [...], détruit alors des centaines d'édifices dans toute la France. [...]

[L]a tour de logements telle qu'elle apparaît aujourd'hui en France semble résulter d'un modèle mondialisé (Douay, 2015) que l'on retrouve de Vancouver à Melbourne en pas-

sant par l'Europe. La résidence service, offre non seulement la possibilité aux habitants de modifier jusqu'au dernier moment la conception de leur intérieur comme ils le désirent, mais surtout des aménités collectives allant de la salle de sport à la conciergerie 24h/24. [...] Plus qu'un simple bâtiment, la tour désigne dorénavant un package de services, d'espaces et d'équipements publics, de bâtiments annexes notamment sociaux, qui dessinent les contours d'un complexe architectural vertical. [...]

Chaque projet [de tour résidentielle à Lyon] dispose de sa ligne directrice propre. Ils sont envisagés comme des micro-mondes à l'intérieur de contextes spatiaux avec lesquels ils sont cohérents. La clientèle potentielle de "Regards sur la Ville" [une des nouvelles tours] est celle de jeunes actifs, potentiellement avec de jeunes enfants, travaillant en ville mais ayant choisi un quartier assez calme, avec une offre de commerces suffisante et une bonne desserte en transports en commun. D'où le développement d'une offre de services complémentaires autour de la convivialité et de la nature. La ligne directrice du projet [de tour résidentielle] "Sky Avenue" s'envisage autour de l'itinérance et de l'activité professionnelle. Elle vante la proximité de la gare centrale de la Part-Dieu [...] ainsi que l'apport d'un certain confort. Ce qui n'est pas sans rappeler l'offre de service d'hôtels de luxe.

Question 20 Où sont construits les immeubles de grande hauteur aujourd'hui ?

☐ Empty ☐ 0 ☐ 0.5 ☒ 1

1/1

(0.5 pts) Dans les métropoles, dans des quartiers à proximité des centres-villes perçus comme dynamiques et attractifs.

(0.5 pts) Dans des zones bien desservies par les transports en commun (bus, tramway, métro, train, aéroport).

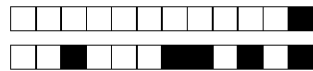
Question 21 Quelles sont les principales différences entre ces nouvelles tours d'habitation et les tours d'habitation construites pendant les "Trente Glorieuses" ?

☐ Empty ☐ 0 ☐ 0.5 ☐ 1 ☒ 1.5

5/1.5

Les tours des Trente Glorieuses... (0.25 pts) s'inscrivent dans un projet social d'accès au logement pour tous (0.25 pts) ont été construites dans des quartiers résidentiels, loin des services et des emplois (0.25 pts) La voiture individuelle était le mode de transport idéal pour faire ces déplacements.

Les nouvelles tours... (0.25 pts) sont construites pour loger des classes favorisées, des cadres (0.25 pts) proposent des services intégrés dans l'immeuble (salle de sport, conciergerie...) (0.25 pts) la tour contemporaine est une figure mondialisée, standardisée, que l'on retrouve dans la plupart des grandes métropoles.

**Question 22**

Donnez deux exemples de modes de transport "doux".

☐ Empty ☐ 0 ☐ 0.25 ☒ 0.5 **5/0.5**

(0.25 pts) par ex. : La marche, le vélo et la trottinette (électrique ou non), les rollers, le bus, le tramway, le métro, le téléphérique urbain

Question 23 D'après le texte (et vos connaissances) à quoi fait référence la dimension symbolique des tours? Quelles sont les imaginaires véhiculés par ce type de construction? Vous pourrez évoquer les aspects sociaux, environnementaux, politiques et techniques.

3/3

☐ Empty ☐ 0 ☐ 0.5 ☐ 1 ☐ 1.5 ☐ 2 ☐ 1.5 ☒ 3

NB : L'objectif n'est pas d'évaluer en tant que telle l'opinion des élèves, ce qui nous intéresse ici c'est la capacité d'argumentation, à discuter différentes interprétations possibles, à faire le lien entre la tour d'habitation considérée comme une réponse technique (avec ses contraintes mécaniques, thermiques, environnementales etc...) et les dimensions symboliques, culturelles, sociales et imaginaires. Plus qu'une longue liste de thématiques, on attend **des explications** sur les liens que proposent les étudiants.

(0.5 pts) Réserver un demi-point pour juger de la qualité formelle du texte : clarté, structuration du propos, vocabulaire

(0.5 pts) Les tours sont aujourd'hui associées à une esthétique moderne, high-tech et technophile, elles supposent l'utilisation de systèmes techniques complexes (matériaux de construction, chauffage et climatisation, ventilation, ascenseur, pompes).

(1 pts) On valorisera les réponses qui montrent les ambivalences des tours plutôt que d'en donner une vision unilatérale et monolithique :

- elles sont à la fois des symboles de prospérité, d'élitisme, de luxe (le penthouse avec piscine et hélicoptère) et des symboles de pauvreté, de relégation urbaine, de chômage, voire d'insécurité (la tour de banlieue)

- un symbole de compacité urbaine, connecté aux réseaux de transports en commun et en même temps une typologie consommatrice d'énergie qui a pu s'inscrire dans un schéma d'étalement urbain.

(1 pts) Des éléments argumentés sont attendus des étudiants qui peuvent utiliser des exemples pour illustrer leur réflexion et insister sur l'un ou l'autre des imaginaires (liste non exhaustive) :

- l'autosuffisance, l'autarcie : la tour comme espace clôt (protection, ouvrage défensif) dans lequel on a tout ce qu'il faut, isolé du reste de la ville, un espace privatif accessible uniquement à ses habitants. La tour s'arrache aux conditions matérielles (le sol), pour toucher le ciel. C'est la figure de la tour d'ivoire

- la concentration de flux, de capitaux, de personnes : la tour réclame un investissement conséquent, elle n'est possible que par un rassemblement de capitaux qui se focalisent en un centre névralgique.

- la puissance, le pouvoir le contrôle sur l'environnement urbain qui s'incarne dans la monumentalité, le fait d'imposer cette forme dans le paysage urbain, qui la rend repérable, comme un beffroi, un clocher, un minaret, une horloge ou un palais...

- dans une symbolique plus judéo-chrétienne, la tour peut renvoyer à la démesure, l'orgueil, l'ambition (tour de Babel). On peut insister sur la fragilité des tours liée à leur dépendance aux réseaux d'approvisionnement (électricité, eau, égouts, nourriture...), les difficultés à évacuer les tours en cas de catastrophe (incendie, terrorisme...)