COVID-19 pandemic control: balancing detection policy and lockdown intervention under ICU sustainability

Arthur Charpentier, UQAM
(with Romuald Elie, Mathieu Laurière & Viet Chi Tran)

https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.05.13.20100842v2

Septembre 2Q20 - modcov19
Analyse coût-efficacité de stratégies de contrôle épidémique

Valeur de la vie (introduction)

RECHERCHES | CHRONIQUE PAR BÉATRICE CHERRIER

Calculer le prix d'une vie humaine

Nouveaux traitements médicaux, lutte contre la pollution, secours aux populations frappées par une catastrophe naturelle, évaluation de la limitation de vitesse à 80 km/h : nombreuses sont les décisions politiques qui nécessitent de chiffrer la valeur d'une vie, sauvée ou perdue. Si la méthode peut sembler cynique et contestable sur le plan éthique, la mise en chantier d'une nouvelle action publique ne se fait plus sans que son coût soit comparé au bénéfice qui sera tiré des vies ainsi préservées. En France, la valeur d'une vie est, d'après un rapport, évaluée à 3 millions d'euros (*« Elements pour une révision de la valeur de la vie humaine »*, Commissariat général à la stratégie et à la prospective, 2013). Comment ce chiffre est-il construit, quels en sont les ressorts méthodologiques et éthiques ?

Si ce chiffrage fut effectué pour la première fois en France en 1994 par l'économiste Marcel Boiteux, ses origines sont à rechercher au sein des services de l'armée de l'air américaine pendant la guerre froide, rapporte l'économiste Spencer Banzhaf (*« The Cold-War Origins of the Value of Statistical Life »*, *Journal of Economic Perspective* n° 28/4, 2014). A la fin des années 1940, l'US Air Force cherche à maximiser les dommages infligés par ses raids aériens potentiels contre l'URSS. Elle s'adresse alors à un groupe de chercheurs de la RAND Corporation. Ceux-ci proposent de faire voler un grand nombre d'avions peu coûteux pour leurrer les défenses aériennes soviétiques. Mécontents, les généraux de l'Air Force pointent alors que le coût de la vie des pilotes sacrifiés ne figurait même pas dans les calculs des scientifiques ! Il fallut vingt ans à la RAND pour résoudre le problème.

« Vie statistique »

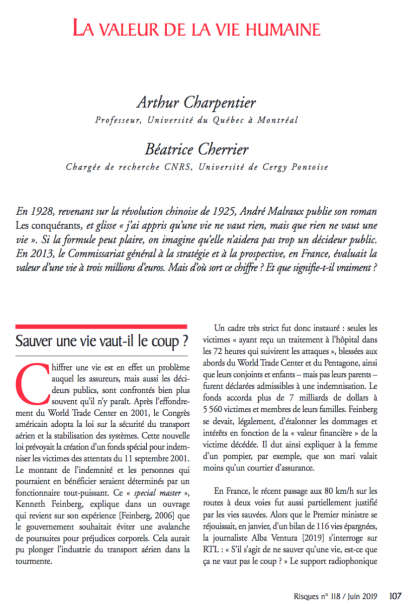
L'économiste Jack Hirshleifer proposa d'abord d'évaluer la vie d'un pilote à l'aune du coût de sa formation. Dans les années 1960, on suggéra d'utiliser plutôt une estimation des salaires nets perçus au cours d'une vie de pilote, supposés refléter l'utilité matérielle dudit métier. Ce n'était pas satisfaisant. Il semblait y avoir dans le prix d'une vie un élément incommensurable empêchant une comparaison avec les coûts matériels.

Le problème piqua l'attention de Thomas Schelling, spécialiste de la modélisation économique des conflits qui obtint le prix Nobel en 2005, et de son étudiant Jack Carlson, lui-même ancien pilote militaire. Se fondant sur son expérience, ce dernier proposa d'inférer des améliorations apportées par son ex-employeur au système d'éjection des avions B-58 la valeur que celui-ci donnait à la vie de son personnel : la mise au point d'un tel système coûtait 80 000 dollars, et permettait d'augmenter la probabilité de survie de quelques points. Par un calcul, on pouvait en déduire la valeur de la vie d'un pilote. Ce raisonnement était nouveau, il permettait d'établir un lien entre la valeur d'une vie et la notion de risque. C'est ce lien que le terme « vie statistique » s'efforce de traduire.

Mais Schelling est allé plus loin, afin d'éviter que les décideurs se retrouvent en situation de faire des choix éthiques douloureux... A l'époque, des mouvements revendiquant la reconnaissance de la « souveraineté du consommateur » fleurissaient partout aux Etats-Unis. S'en inspirant, il proposa de confier aux citoyens eux-mêmes l'évaluation de la valeur de leur vie. S'ils étaient incapables de chiffrer leur vie de but en blanc, on pouvait néanmoins étendre la méthode de Carlson : demander à un échantillon de personnes combien elles paieraient, par exemple, pour un airbag ou un traitement médical diminuant leur risque de mortalité de 1 %, et dériver de leur chiffrage la valeur qu'elles attribuent à leur propre vie.

Si ce mode de calcul fait aujourd'hui débat, puisque la valeur d'une vie pour la société se réduit dès lors à une évaluation individuelle d'un risque de décès, c'est néanmoins celui qui demeure le plus répandu pour prendre des décisions publiques. ■

Béatrice Cherrier est économiste à l'université de Cergy-Pontoise et à l'Institute for New Economic Thinking



LA VALEUR DE LA VIE HUMAINE

Arthur Charpentier
Professeur, Université du Québec à Montréal

Béatrice Cherrier
Chargée de recherche CNRS, Université de Cergy Pontoise

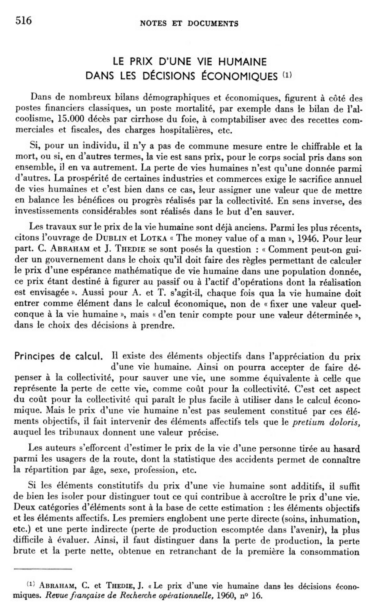
En 1928, revenant sur la révolution chinoise de 1925, André Malraux publie son roman Les conquérants, *et glisse « J'ai appris qu'une vie ne vaut rien, mais que rien ne vaut une vie ». Si la formule peut plaire, on imagine qu'elle n'aidera pas trop un décideur public. En 2013, le Commissariat général à la stratégie et à la prospective, en France, évaluait la valeur d'une vie à trois millions d'euros. Mais d'où sort ce chiffre ? Et que signifie-t-il vraiment ?*

Sauver une vie vaut-il le coup ?

Chiffrer une vie est en effet un problème auquel les assureurs, mais aussi les décideurs publics, sont confrontés bien plus souvent qu'il n'y paraît. Après l'effondrement du World Trade Center en 2001, le Congrès américain adopta la loi sur la sécurité du transport aérien et la stabilisation des systèmes. Cette nouvelle loi prévoyait la création d'un fonds spécial pour indemniser les victimes des attentats du 11 septembre 2001. Le montant de l'indemnité et les personnes qui pourraient en bénéficier seraient déterminés par un fonctionnaire tout-puissant. Ce « *special master* », Kenneth Feinberg, explique dans un ouvrage qui revient sur son expérience [Feinberg, 2006] que le gouvernement souhaitait éviter une avalanche de poursuites pour préjudices corporels. Cela aurait pu plonger l'industrie du transport aérien dans la tourmente.

Un cadre très strict fut donc instauré : seules les victimes « ayant reçu un traitement à l'hôpital dans les 72 heures qui suivirent les attaques », blessées aux abords du World Trade Center et du Pentagone, ainsi que leurs conjoints et enfants – mais pas leurs parents – furent déclarées admissibles à une indemnisation. Le fonds accorda plus de 7 milliards de dollars à 5 560 victimes et membres de leurs familles. Feinberg se devait, légalement, d'étalonner les dommages et intérêts en fonction de la « valeur financière » de la victime décédée. Il dut ainsi expliquer à la femme d'un pompier, par exemple, que son mari valait moins qu'un courtier d'assurance.

En France, le récent passage aux 80 km/h sur les routes à deux voies fut aussi partiellement justifié par les vies sauvées. Alors que le Premier ministre se réjouissait, en janvier, d'un bilan de 116 vies épargnées, la journaliste Alba Ventura [2019] s'interroge sur RTL : « S'il s'agit de ne sauver qu'une vie, est-ce que ça ne vaut pas le coup ? » Le support radiophonique



LE PRIX D'UNE VIE HUMAINE
DANS LES DÉCISIONS ÉCONOMIQUES [1]

Dans de nombreux bilans démographiques et économiques, figurent à côté des postes financiers classiques, un poste mortalité, par exemple dans le bilan de l'alcoolisme, 15.000 décès par cirrhose du foie, à comptabiliser avec des recettes commerciales et fiscales, des charges hospitalières, etc.

Si, pour un individu, il n'y a pas de commune mesure entre le chiffrable et la mort, ou si, en d'autres termes, la vie est sans prix, pour le corps social pris dans son ensemble, il en va autrement. La perte de vies humaines n'est qu'une donnée parmi d'autres. La prospérité de certaines industries et commerces exige le sacrifice annuel de vies humaines et c'est bien dans ce cas, leur assigner une valeur que de mettre en balance les bénéfices ou progrès réalisés par la collectivité. En sens inverse, des investissements considérables sont réalisés dans le but d'en sauver.

Les travaux sur le prix de la vie humaine sont déjà anciens. Parmi les plus récents, citons l'ouvrage de Dublin et Lotka « The money value of a man », 1946. Pour leur part. C. Abraham et J. Thédie se sont posés la question : « Comment peut-on guider un gouvernement dans le choix qu'il doit faire des règles permettant de calculer le prix d'une espérance mathématique de vie humaine dans une population donnée, ce prix étant destiné à figurer au passif ou à l'actif d'opérations dont la réalisation est envisagée ». Aussi pour A. et T. s'agit-il, chaque fois qua la vie humaine doit entrer comme élément dans le calcul économique, non de « fixer une valeur quelconque à la vie humaine », mais « d'en tenir compte pour une valeur déterminée », dans le choix des décisions à prendre.

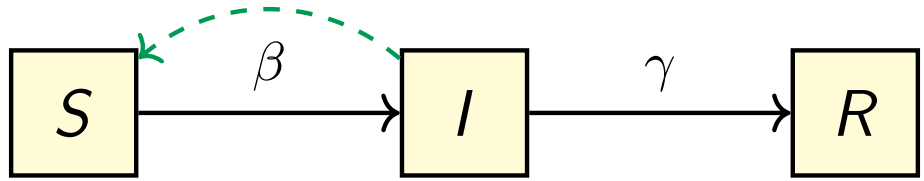
Principes de calcul. Il existe des éléments objectifs dans l'appréciation du prix d'une vie humaine. Ainsi on pourra accepter de faire dépenser à la collectivité, pour sauver une vie, une somme équivalente à celle que représente la perte de cette vie, comme coût pour la collectivité. C'est cet aspect du coût pour la collectivité qui paraît le plus facile à utiliser dans le calcul économique. Mais le prix d'une vie humaine n'est pas seulement constitué par ces éléments objectifs, il fait intervenir des éléments affectifs tels que le *pretium doloris*, auquel les tribunaux donnent une valeur précise.

Les auteurs s'efforcent d'estimer le prix de la vie d'une personne tirée au hasard parmi les usagers de la route, dont la statistique des accidents permet de connaître la répartition par âge, sexe, profession, etc.

Si les éléments constitutifs du prix d'une vie humaine sont additifs, il suffit de bien les isoler pour distinguer tout ce qui contribue à accroître le prix d'une vie. Deux catégories d'éléments sont à la base de cette estimation : les éléments objectifs et les éléments affectifs. Les premiers englobent une perte directe (soins, inhumation, etc.) et une perte indirecte (perte de production escomptée dans l'avenir), la plus difficile à évaluer. Ainsi, il faut distinguer dans la perte de production, la perte brute et la perte nette, obtenue en retranchant de la première la consommation

[1] Abraham, C. et Thédie, J. « Le prix d'une vie humaine dans les décisions économiques. *Revue française de Recherche opérationnelle*, 1960, nº 16.

SIR model with controls & constraints

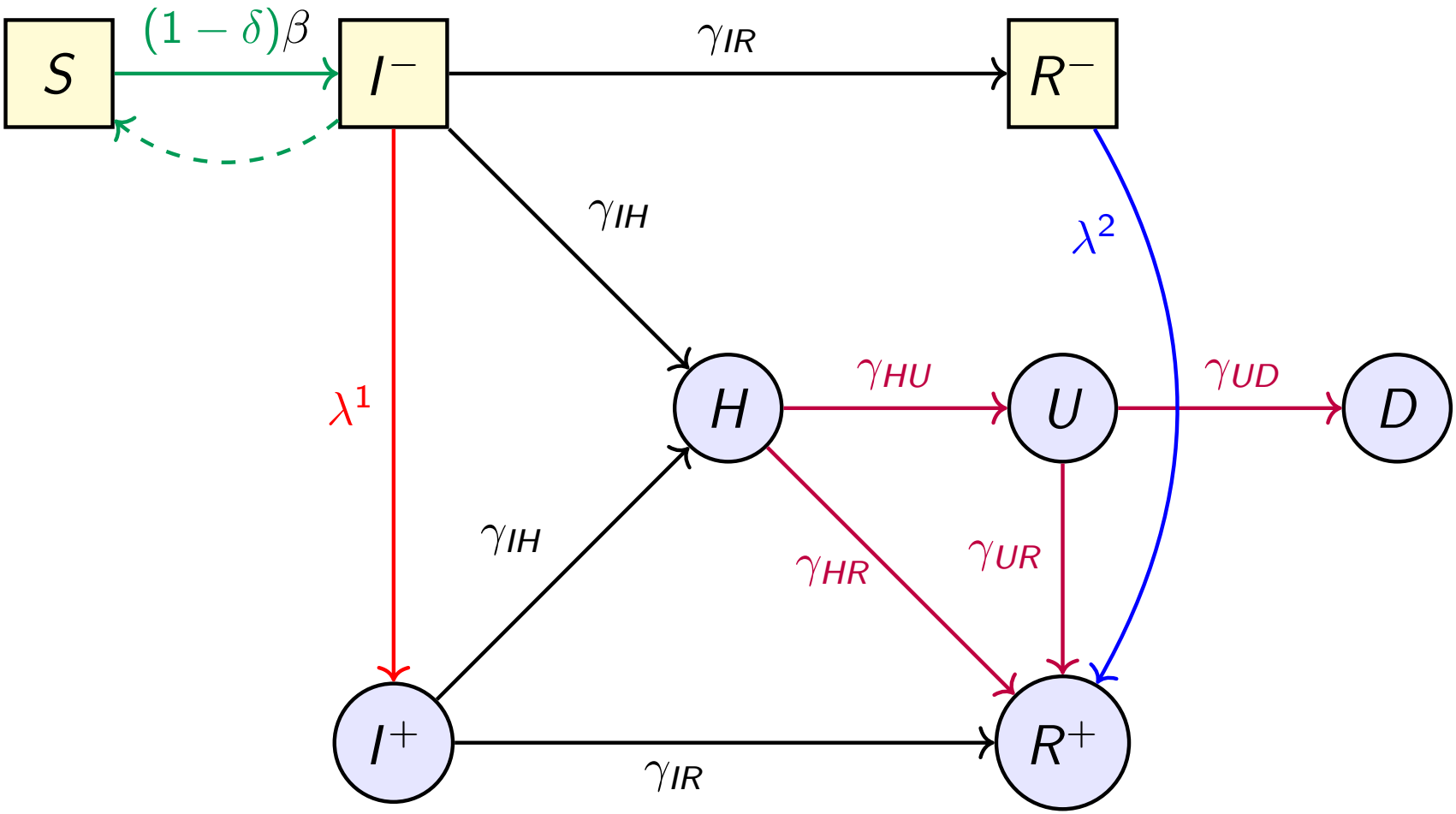


$$\frac{\mathrm{d}S_t}{\mathrm{d}t} = -\beta S_t I_t, \quad \frac{\mathrm{d}I_t}{\mathrm{d}t} = \beta S_t I_t - \gamma I_t, \quad \text{and } \frac{\mathrm{d}R_t}{\mathrm{d}t} = \gamma I_t.$$

Important quantity: $\mathfrak{R}_0 = \dfrac{\beta}{\gamma}$ (reproductive ratio).

- lockdown: $S \to (1-\delta)S$
- asymptotic: $I \to (I^+, I^-)$ and $R \to (R^+, R^-)$
- more categories: H, ICU and D
- testing/detection: $I^- \to I^+$ and $R^- \to R^+$

The $SIDUHR^{+/-}$ model



The $SIDUHR^{+/-}$ model

$$
\begin{cases}
\mathrm{d}S_t = -(1-\delta_t)\beta_t I^- S_t \mathrm{d}t, & \text{Susceptible} \\
\mathrm{d}I_t^- = (1-\delta_t)\beta I_t^- S_t \mathrm{d}t - \lambda_t^1 I_t^- \mathrm{d}t - (\gamma_{IR}+\gamma_{IH}) I_t^- \mathrm{d}t, & \text{Infected} - \\
\mathrm{d}I_t^+ = \lambda_t^1 I_t^- \mathrm{d}t - (\gamma_{IR}+\gamma_{IH}) I_t^+ \mathrm{d}t, & \text{Infected} + \\
\mathrm{d}R_t^- = \gamma_{IR} I_t^- \mathrm{d}t - \lambda_t^2 R_t^- \mathrm{d}t, & \text{Recovered} - \\
\mathrm{d}R_t^+ = \gamma_{IR} I_t^+ \mathrm{d}t + \lambda_t^2 R_t^- \mathrm{d}t + \gamma_{HR} H_t \mathrm{d}t + \gamma_{UR}(U_t) U_t \mathrm{d}t, & \text{Recovered} + \\
\mathrm{d}H_t = \gamma_{IH}\left(I_t^- + I_t^+\right)\mathrm{d}t - (\gamma_{HR}+\gamma_{HU}) H_t \mathrm{d}t, & \text{Hospitalized} \\
\mathrm{d}U_t = \gamma_{HU} H_t \mathrm{d}t - (\gamma_{UR}(U_t)+\gamma_{UD}(U_t)) U_t \mathrm{d}t, & \text{ICU} \\
\mathrm{d}D_t = \gamma_{UD}(U_t) U_t \mathrm{d}t, & \text{Dead}
\end{cases}
$$

$$
\mathfrak{R}_0 = \frac{(1-\delta_0)\beta}{\lambda_0^1 + \gamma_{IR} + \gamma_{IH}} \text{ and } \mathfrak{R}_t = \frac{(1-\delta_t)\beta S_t}{\lambda_t^1 + (\gamma_{IR}+\gamma_{IH})}.
$$

Controls and constraints

Controls

- δ: lower social contacts

  lockdown / quarantine / masks
- λ_1: virologic tests, type-1 (short term)

  identify I^- ($\rightarrow I^+$)
- λ_2: antibody tests, type-2 (long term)

  identify R^- ($\rightarrow R^+$)

Constraints

- "*flatten the curve*" : ICU sustainability, $U_t \leq \overline{u}$

Objective

$$\min_{(\delta_t),(\boldsymbol{\lambda}_t)} \left\{ w C_{\text{sanitary}} + w_E C_{\text{econ}} + w_T C_{\text{test}} \right\}$$

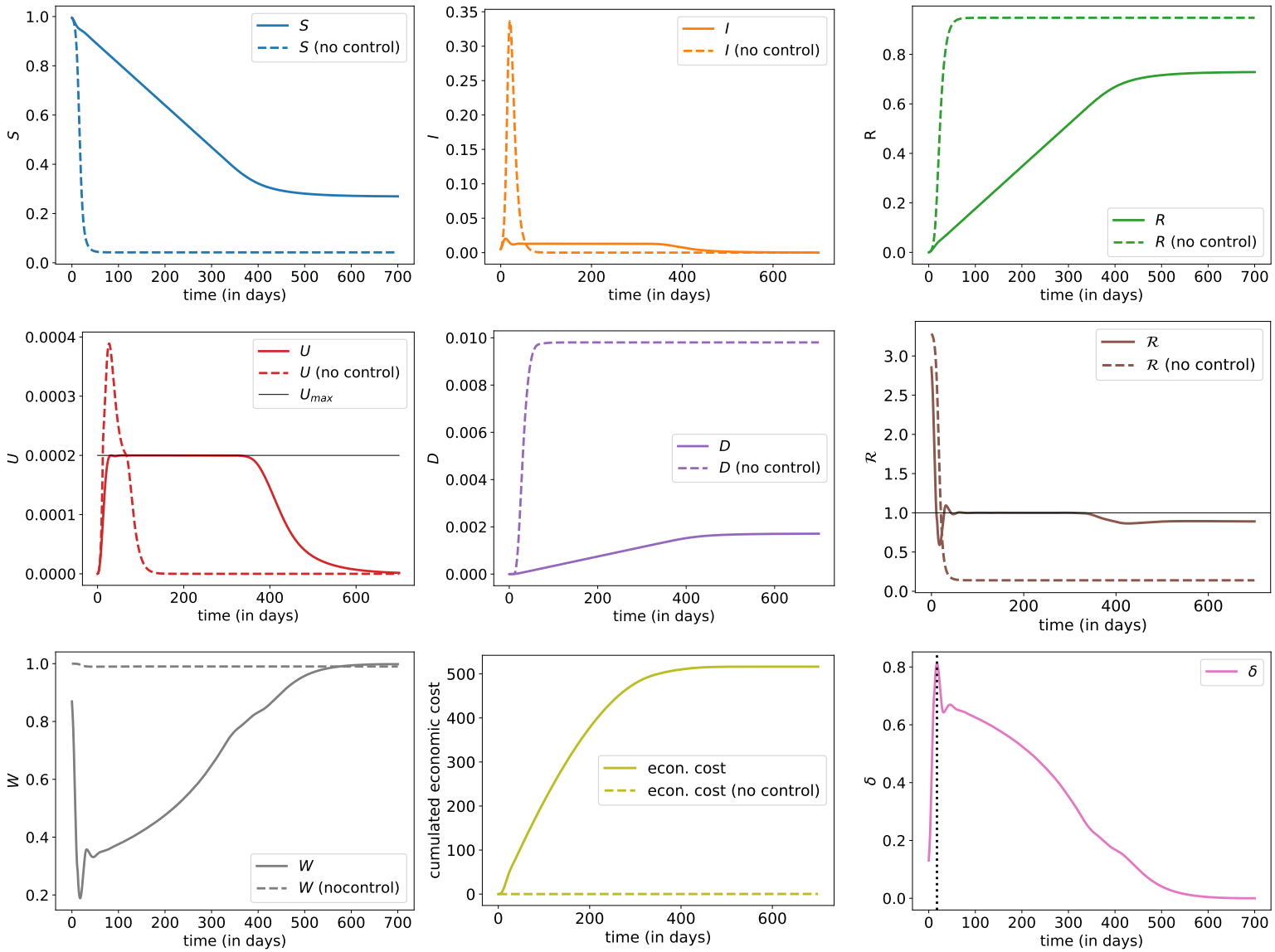
The objective function

$$\begin{cases} Q_t = R_t^- + I_t^- + S_t & \text{(suceptible to be) quarantined/lockdowned} \\ W_t = (1-\delta_t)Q_t + R_t^+ & \text{work force} \\ N_t^1 = \lambda_t^1 Q_t + \gamma_{IH} I_t^- & \text{virologic tests, type-1 (short term)} \\ N_t^2 = \lambda_t^2 Q_t & \text{antibody tests, type-2 (long term)} \end{cases}$$

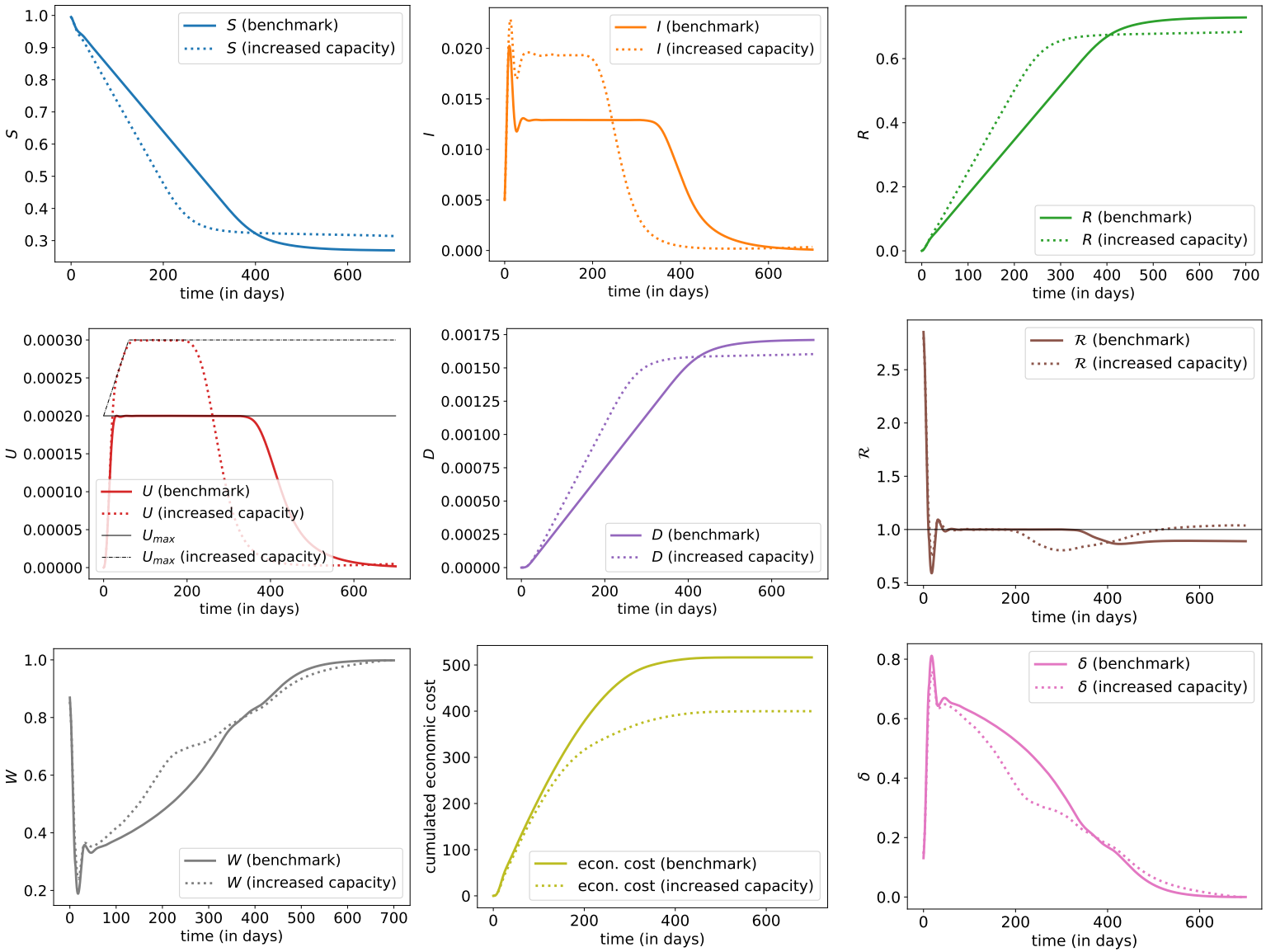
$$\begin{cases} C_{\text{sanitary}} &= \mathbb{E}(D_\tau) = \displaystyle\int_0^\infty e^{-\alpha t}\mathrm{d}D_t \\ C_{\text{econ}} &= \mathbb{E}\left[\displaystyle\int_0^\tau (1-W_t)^2\mathrm{d}t\right] = \displaystyle\int_0^\infty e^{-\alpha t}(1-W_t)^2\mathrm{d}t \\ C_{\text{prevalence}} &= \mathbb{E}\left[\displaystyle\int_0^\tau |N_t^1|^2\mathrm{d}t\right] = \displaystyle\int_0^\infty e^{-\alpha t}|N_t^1|^2\mathrm{d}t \\ C_{\text{immunity}} &= \mathbb{E}\left[\displaystyle\int_0^\tau |N_t^2|^2\mathrm{d}t\right] = \displaystyle\int_0^\infty e^{-\alpha t}|N_t^2|^2\mathrm{d}t \end{cases}$$

Computational issue: $\infty = 700$ days

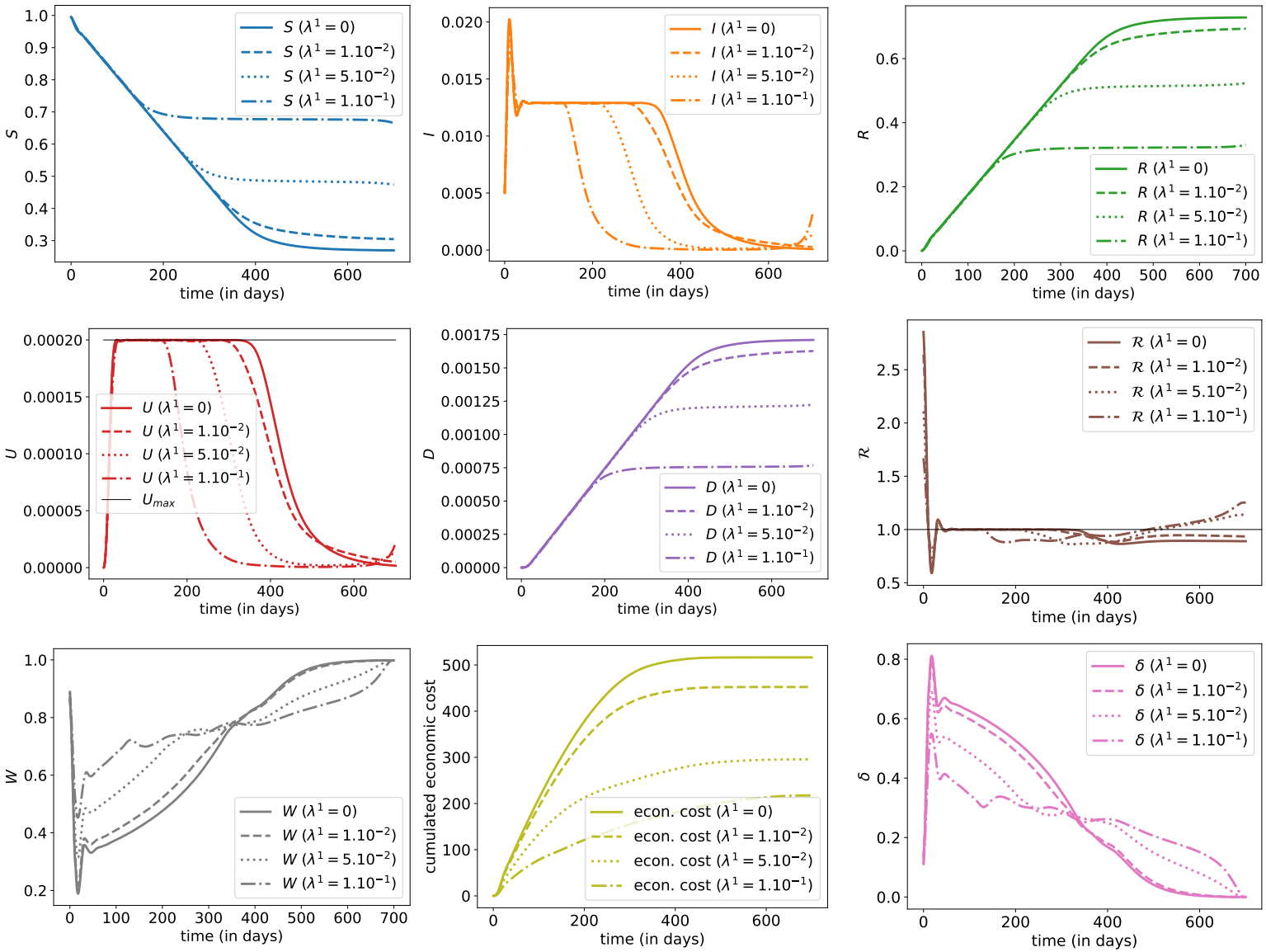
With optimal (δ_t^*) (Fig. 3)



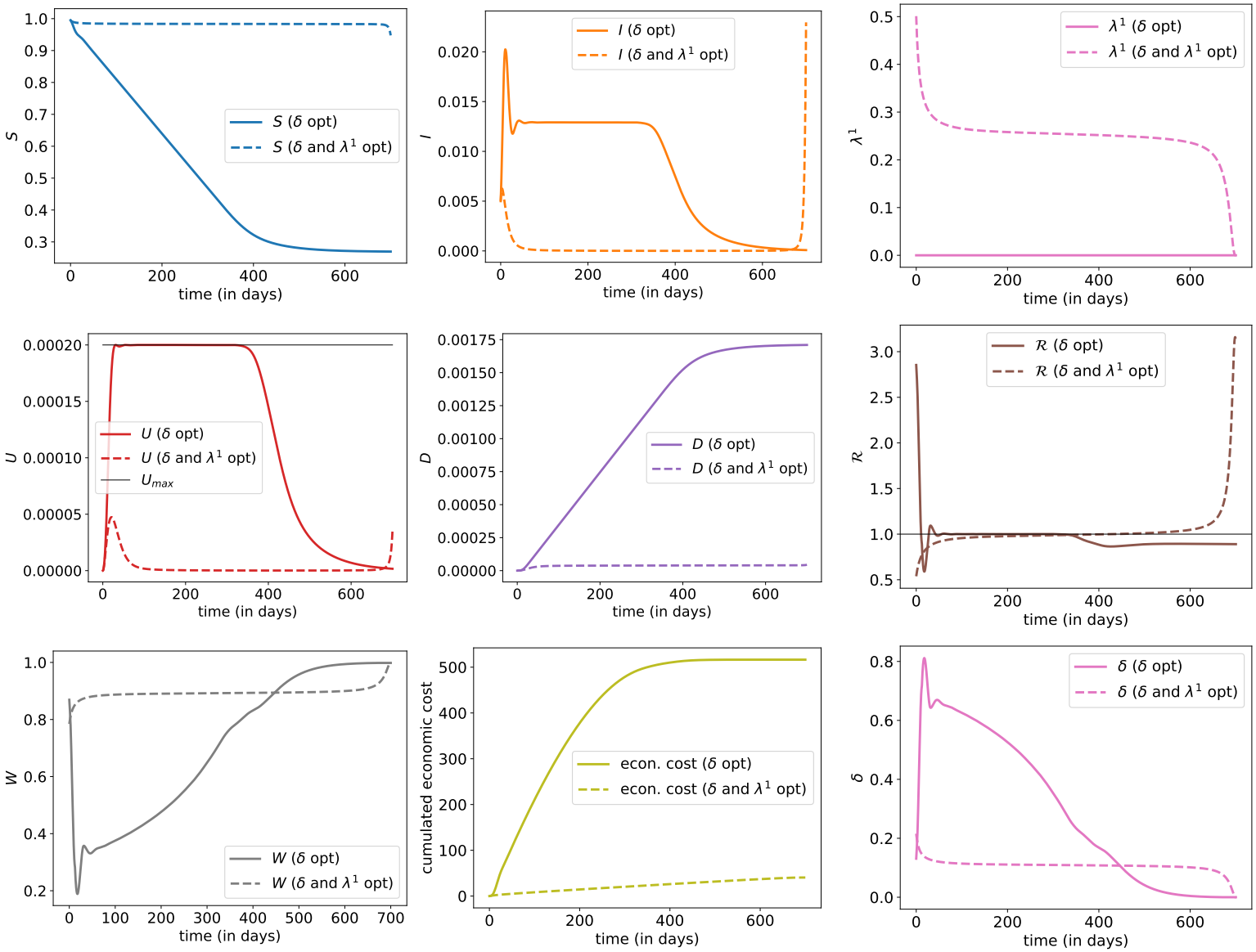
Optimal (δ_t^*) with increase of *ICU* (Fig. 4)



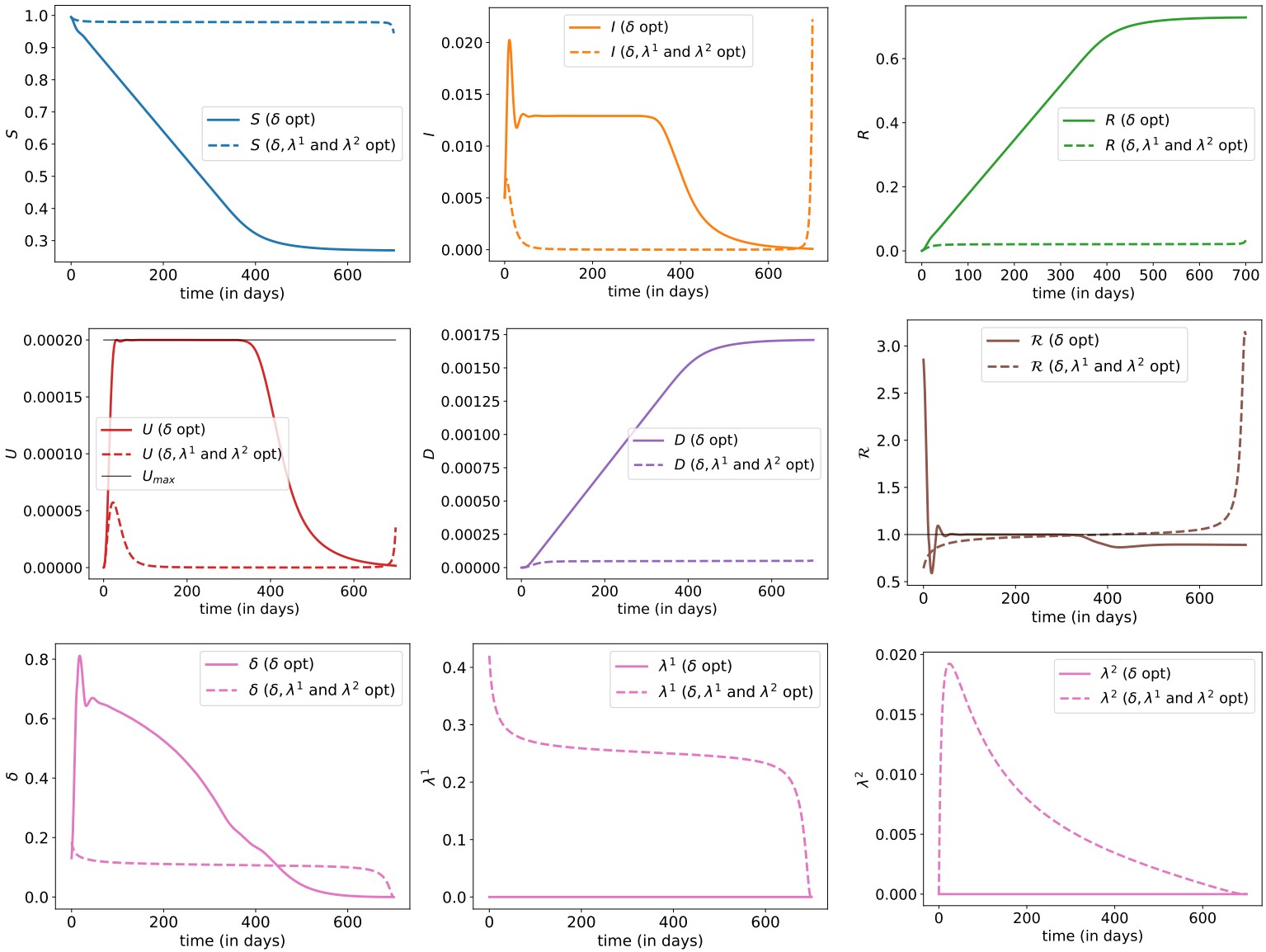
Impact of (λ_t^1) (constant, Fig. 10, B5)



Impact of (λ_t^{1*}) (Fig. 12, B7)



Impact of (λ_t^{2*}) (Fig. 16, B11)



Taking in account ages

Susceptibles $\boldsymbol{S} = (S_c, S_a, S_s)$, with children, adults and seniors,

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{pmatrix} S_{c,t} \\ S_{a,t} \\ S_{s,t} \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} S_{c,t} \\ S_{a,t} \\ S_{a,t} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \beta_{c,c} & \beta_{c,a} & \beta_{c,s} \\ \beta_{a,c} & \beta_{a,a} & \beta_{a,s} \\ \beta_{s,c} & \beta_{s,a} & \beta_{s,s} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{c,t} \\ I_{a,t} \\ I_{a,t} \end{pmatrix},$$

i.e.

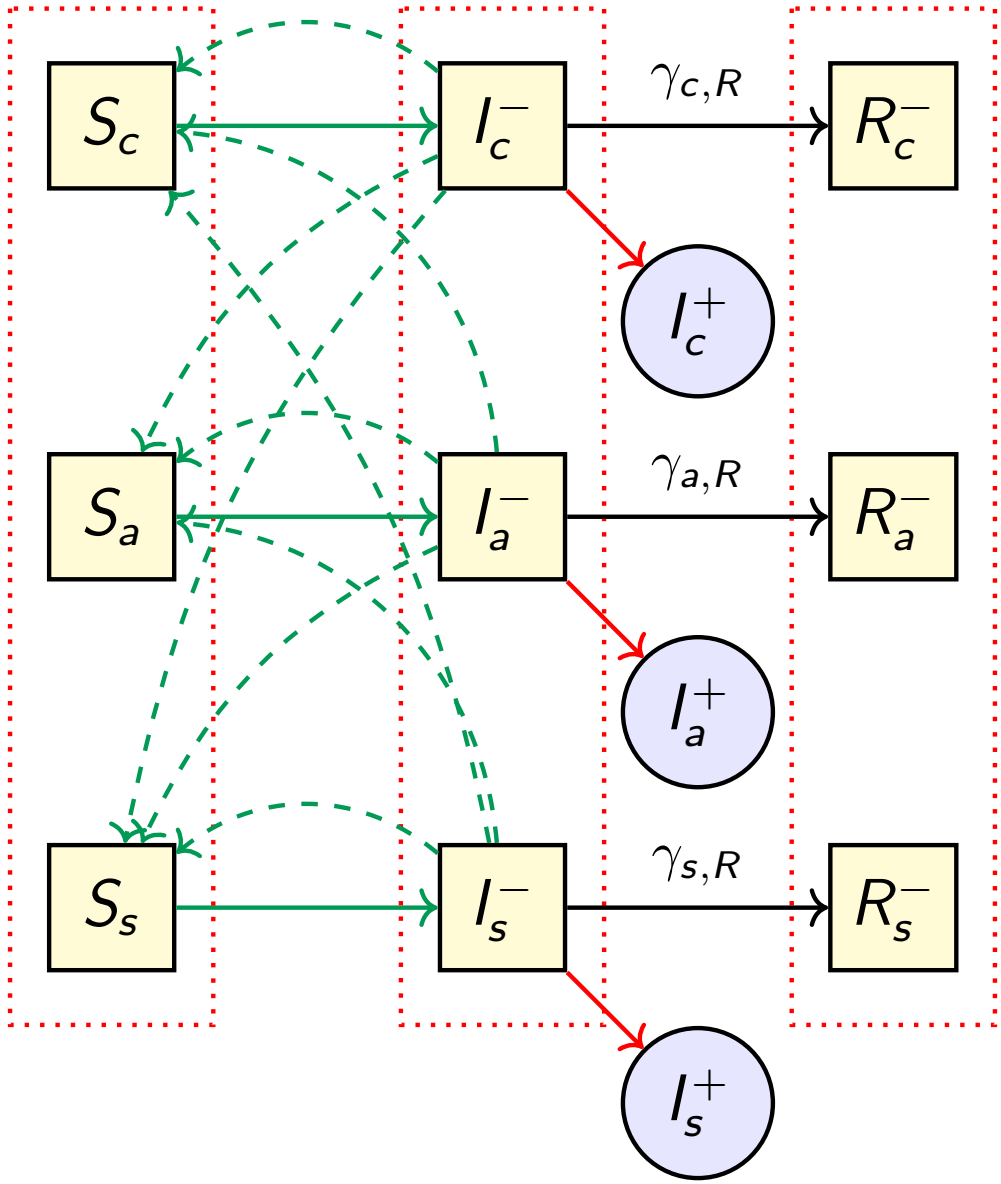
$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{S}_t = -\boldsymbol{S}_t \cdot \boldsymbol{B}\boldsymbol{I}_t$$

for some 3×3 WAIFW (*Who Acquires Infection From Whom*) matrix,

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{I}_t = \boldsymbol{S}_t \cdot \boldsymbol{B}\boldsymbol{I}_t - \gamma \mathbf{I}_t \quad \text{and} \quad \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{R}_t = \gamma \boldsymbol{I}_t$$

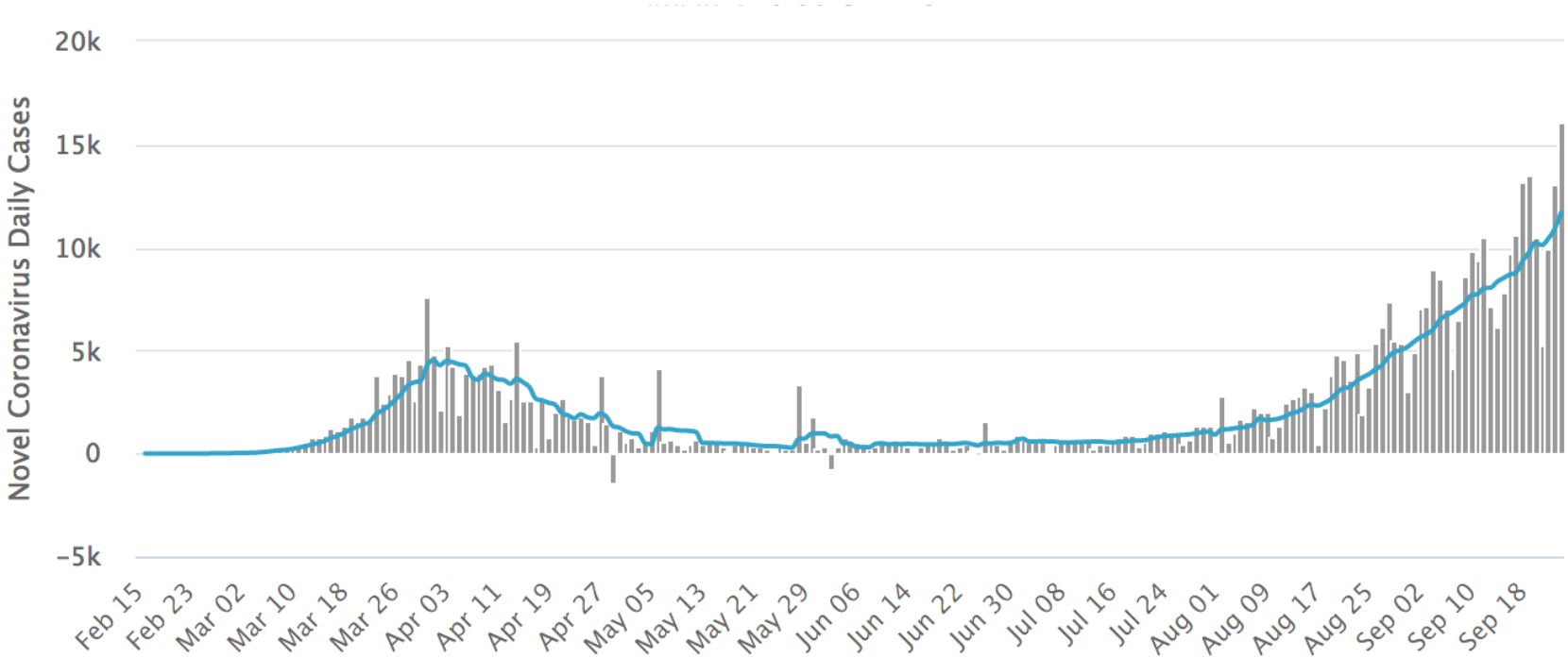
(to be extended in our larger model)

Taking in account ages



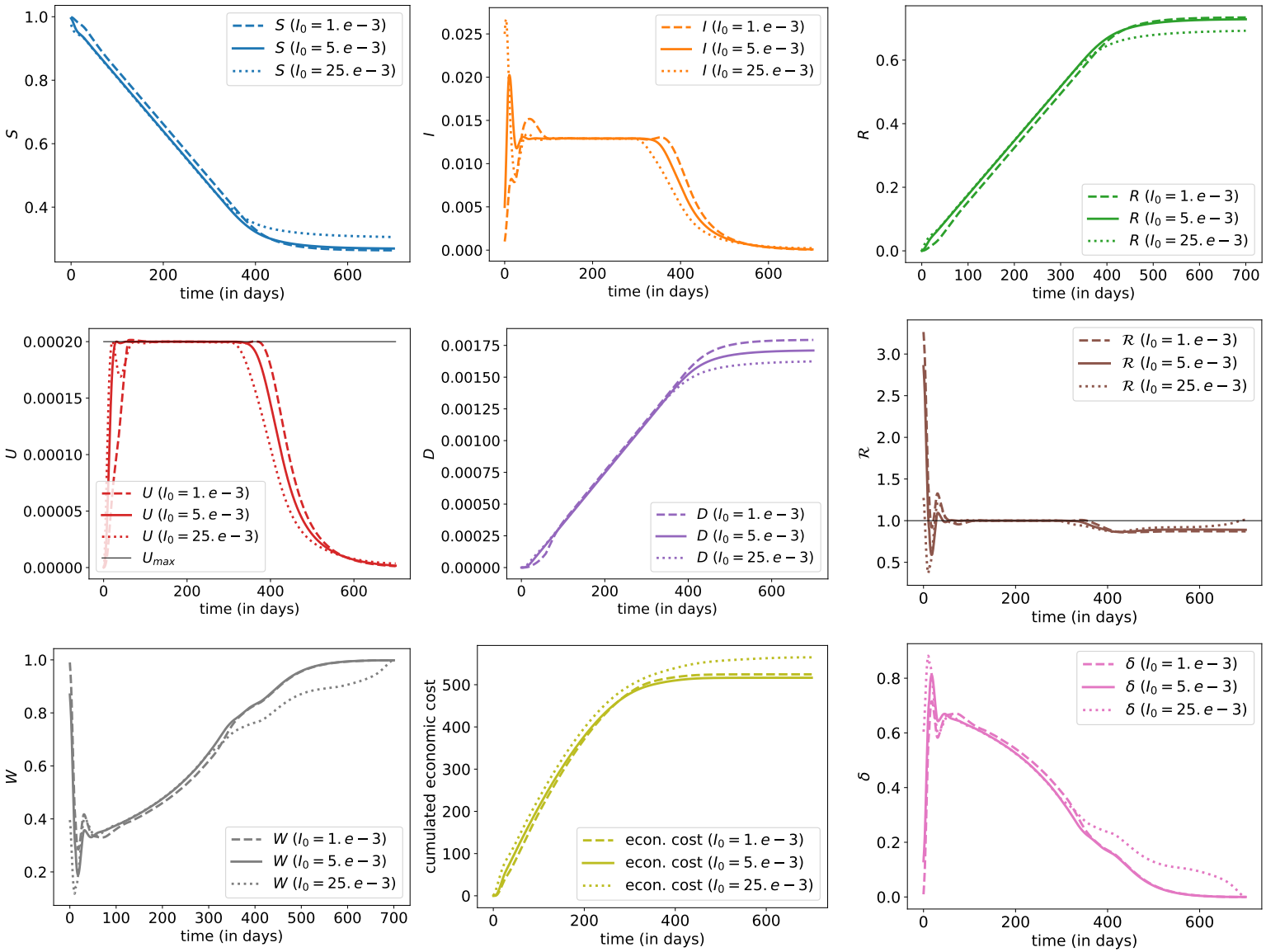
To go further...

Evolution of dI_t^+ (dI_t^{+*} ?) over time, in France

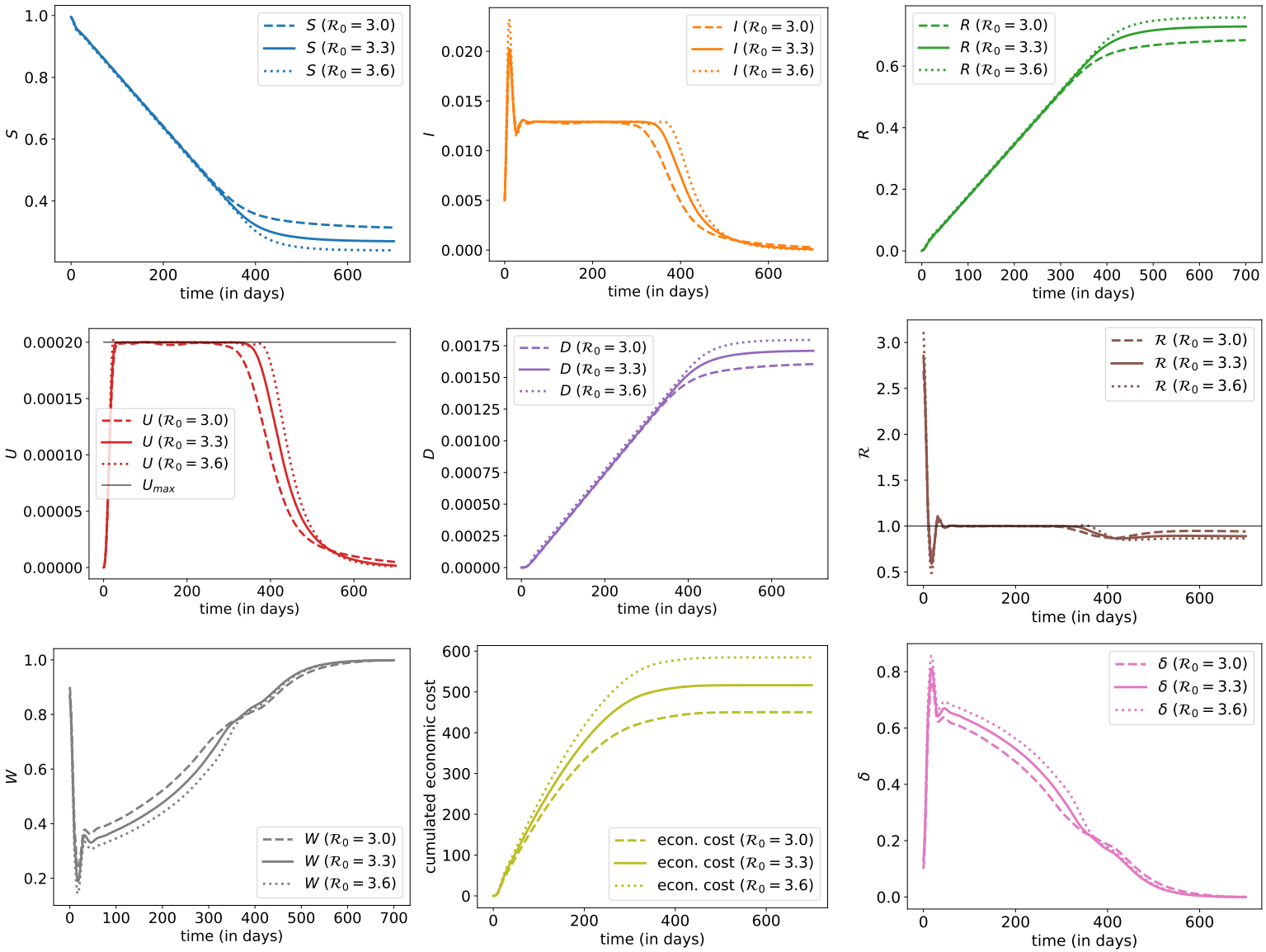


Can we use publicly available data to calibrate models ?

Sensitivity in I_0 (Fig. 6, B1)



Sensitivity in $\mathfrak{R}_0$ (Fig. 7, B2)



Sensitivity in α (Fig. 9, B4)